

В. С. КУЛЕБАКИН
В. Т. МОРОЗОВСКИЙ
И. М. СИНДЕВ

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ САМОЛЕТОВ

В. С. КУЛЕБАКИН, В. Т. МОРОЗОВСКИЙ, И. М. СИНДЕЕВ

ПРОИЗВОДСТВО,
ПРЕОБРАЗОВАНИЕ
И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
НА САМОЛЕТАХ

*Допущено Главным управлением
политехнических и машиностроительных вузов
Министерства высшего образования СССР
в качестве учебного пособия
для авиационных вузов*

ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО ОБОРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
Москва 1956

В книге содержится описание принципов действия и устройства основных элементов оборудования по производству, преобразованию и распределению электрической энергии на самолетах и приводится теория рабочих процессов как отдельных звеньев, так и всей системы электроснабжения самолетов. В книге приводятся описания конструктивных особенностей самолетного электрооборудования и основные технические данные для наиболее распространенных видов оборудования.

Рецензенты: 1. Коллектив кафедры авиационного электрооборудования Московского авиационного института имени Орджоникидзе — заведующий кафедрой канд. техн. наук доцент **Ю. А. Попов.**

2. Заведующий кафедрой электрооборудования самолетов и автомобилей Московского энергетического института имени Молотова член-корр. АН СССР, проф. **А. Н. Ларионов.**

Редактор канд. техн. наук доцент **А. М. Сенкевич**

Зав. редакцией инж. **А. И. Соколов**

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время электрическая энергия применяется для самых разнообразных целей на самолетах, вертолетах и других летательных аппаратах; устанавливаемое на них электрическое оборудование представляет собой сложный комплекс различных по принципу действия и конструктивному выполнению машин, аппаратов, приборов.

Специфические условия работы как всей системы электрооборудования самолетов, так и отдельных элементов его, а также специальные требования, предъявляемые к этому электрооборудованию, усложняют задачу электрификации самолетов и выдвигают необходимость особого подхода к решению многих вопросов, связанных с практическим использованием электрической энергии на летательных аппаратах.

В силу этих причин наука об электрификации самолетов за последние годы выделилась из области авиационной техники и электротехники в самостоятельную дисциплину, и знание всех особенностей применения электрической энергии в авиации, а также правильного использования ее на всех видах летательных устройств стало обязательным не только для электриков, но и для других инженерно-технических работников воздушного флота и для летного состава.

Перед авторами настоящей книги стояла трудная задача: подготовить материал, наиболее полно удовлетворяющий программам специальных курсов по электрификации самолетов, и отразить современные тенденции развития самолетного электрооборудования как у нас, так и за рубежом. Для этого авторам пришлось систематизировать и методически обработать имеющуюся научно-техническую литературу по различным вопросам электрификации самолетов и вместе с тем восполнить в ней пробелы, относящиеся главным образом к теоретическим положениям.

Значительная часть вопросов, связанных с электрификацией самолетов, была разработана заново, и многие разделы этой книги представляют результаты самостоятельных теоретических и экспериментальных исследований авторов.

Настоящая книга предназначена для изучения основных вопросов, связанных с производством, преобразованием и распределением электрической энергии на самолетах.

При изложении этих вопросов основное внимание было уделено научному обоснованию принципов действия и устройства отдельных элементов самолетного электрооборудования, а также выяснению влияния различных факторов и параметров на рабочий процесс и на поведение как отдельных элементов, так и всей системы электроснабжения самолетов.

Описание материальной части приводится в этой книге в том объеме, в каком это необходимо для уяснения теоретических положений и физической сущности, с одной стороны, и для понимания особенностей различных конструкций — с другой. Более детальное изучение материальной части должно проводиться на практических занятиях, предусмотренных программой курса.

Предназначая свой труд в качестве учебного пособия для студентов высших авиационных учебных заведений, слушателей военных воздушных академий и инженерных училищ, а также в качестве руководства для инженерно-технического персонала, занимающегося вопросами электрификации самолетов и эксплуатацией самолетного электрооборудования, авторы уделили большое внимание и методической стороне изложения всего сложного комплекса вопросов энергоснабжения на самолетах, используя для этого многолетний опыт преподавания специальных авиационных электротехнических дисциплин.

Но авторы все же далеки от мысли, что их труд является безупречным, и будут весьма благодарны за все критические замечания и пожелания.

Авторы считают своим долгом выразить благодарность К. Д. Рунову, оказавшему большую помощь в окончательном оформлении рукописи этой книги, а также А. М. Сенкевичу, взявшему на себя труд по редактированию этой книги.

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И РОЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО САМОЛЕТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Современные летательные аппараты (самолеты, вертолеты, и т. п.) с точки зрения аэродинамических качеств, использования материалов и конструкции планера, свойств и характеристик, применяемых на нем поршневых и реактивных двигателей являются достаточно совершенными машинами. Но надежность действия этих летательных устройств, возможность осуществления дальних полетов в тяжелых метеорологических условиях днем и ночью, полеты на больших высотах и с большими скоростями, полеты и посадки при отсутствии видимости, выполнение сложных и разнообразных боевых операций немислимы теперь без применения специальных дополнительных устройств: измерительных, контрольных и сигнальных приборов, осветительного оборудования, средств связи (внутренней и внешней, телеграфной и телефонной), навигационного и радиолокационного оборудования, механизмов и аппаратов, облегчающих управление самолетом и авиационным двигателем и т. п. Без этих дополнительных устройств самолеты и вертолеты не могут обладать требуемыми качествами и отвечать своему назначению.

Специальное оборудование самолета по своему объему, характеру, размещению и монтажу должно наилучшим образом содействовать полному использованию летно-тактических свойств летательных аппаратов и облегчать работу членов экипажа в полете и при эксплуатации.

Все это оборудование на современных самолетах и вертолетах представляет сложный комплекс приборов, аппаратов, механизмов, машин, весьма разнообразных по назначению, принципу действия и устройству.

В современных условиях управление различными органами летательных аппаратов, агрегатами винтомоторной группы, стрелковым и бомбардировочным вооружением, средствами связи и другими установками и приборами является достаточно сложным и требует от всех членов экипажа самолета тщательного и детального освоения всей техники, напряженного внимания и точной, безошибочной работы для обеспечения надежности, безопасности полета и выполнения вместе с тем поставленного перед ними задания.

Приведение в действие всех упомянутых выше установок и органов управления ими, естественно, связано с использованием энергии, источники которой на самолете могут служить:

- а) мышечная энергия членов экипажа самолета;
- б) гидравлические установки;
- в) пневматические установки, использующие сжатый воздух или вакуум;
- г) механическая энергия, отбираемая от авиационного двигателя или специального двигателя;
- д) электрические генераторные установки;

- е) химические источники энергии;
- ж) кинетическая энергия вращающихся частей;
- з) энергия движения летательного устройства относительно воздуха.

Само собою понятно, что вопрос об использовании того или иного вида энергии в каждом конкретном случае должен разрешаться в соответствии со всеми предъявляемыми требованиями и с учетом наиболее рационального использования энергии в условиях эксплуатации, но при этом всегда необходимо стремиться довести затрату мышечной энергии членов экипажа до минимума.

С точки зрения надежности работы энергетической системы и удобства эксплуатации целесообразно сколь возможно уменьшать количество видов энергии, используемых для приведения в действие элементов оборудования. Это облегчает также и унификацию оборудования.

Рассмотрение главных элементов оборудования современных самолетов и вертолетов и различных видов энергии, которые возможно использовать для приведения в действие различных установок, показывает, что электрическая энергия является наиболее универсальным видом энергии, так как она может быть применена для всех установок на самолетах, тогда как остальные виды энергии могут быть использованы далеко не во всех устройствах.

Большим достоинством электрической энергии является также и то, что ее легче можно трансформировать в другие виды энергии, передавать на большие расстояния и распределять между всеми потребителями. Электрическую энергию можно широко использовать для автоматизации необходимых сложных операций. Это значительно облегчает управление самолетом, уменьшает напряженность работы экипажа и позволяет ему сосредоточить основное внимание на выполнении поставленных задач.

Электрическое оборудование современных самолетов представляет довольно сложную систему с установленной мощностью источников электрической энергии, доходящей до 250 кВт, с длиной проводов электрической сети в несколько десятков километров, с сотнями различных электрических машин и аппаратов, измерительных, контрольных, сигнальных, коммутационных и защитных приборов, общий вес которых на современных тяжелых самолетах измеряется тысячами килограммов.

В ближайшие годы, в связи с дальнейшим увеличением дальностей полетов и повышением скоростей до 2М и более, общая мощность электрических генераторов возрастет до 600—700 кВт и более; увеличится также и количество потребителей.

Однако, несмотря на такую кажущуюся сложность, система электрифицированного оборудования все же имеет по сравнению с другими системами существенные преимущества в отношении надежности действия, живучести, меньшей уязвимости в боевой обстановке, простоты эксплуатации, а также в отношении веса и занимаемого пространства, поэтому неудивительно, что электрическая энергия в настоящее время получила в авиации весьма широкое применение.

§ 2. КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ САМОЛЕТОВ

Развитие электрификации самолетов тесно связано с прогрессом авиационной техники и электротехники. Электрооборудование летательных аппаратов как одна из отраслей авиационной техники охватывает относительно небольшой период времени и базируется на использовании всех открытий и достижений в области электричества и магнетизма, начиная с блестящих работ русских ученых М. В. Ломоносова, Г. В. Рихмана, В. В. Петрова, Б. С. Якоби, Э. Х. Ленца и др.

Впервые в мире идея широкого использования электрической энергии для летательных устройств была предложена нашим соотечественником — русским инженером и изобретателем Александром Николаевичем Ладыгиным. Этим выдающимся электротехником в 1869 г. был спроектирован летательный аппарат тяжелее воздуха, так называемый «электролет», в котором привод винтов должен был осуществляться от электрического двигателя. Питание этих двигателей на электролете А. Н. Ладыгина предполагалось от специальных аккумуляторов, над созданием которых работали в то время многие русские ученые и изобретатели, в том числе и П. Н. Яблочков.

Первым видом практического применения электрической энергии на самолетах явилось зажигание горючей смеси в авиадвигателях посредством искры, которая получалась от индукционных катушек или специальных устройств — магнето высокого напряжения.

Россия является родиной не только первого в мире самолета, но и родиной тяжелых самолетов.

Еще до первой мировой войны были созданы прославившие русскую авиацию многомоторные бомбардировщики «Русский витязь», «Илья Муромец» и «Святогор».

На самолете «Илья Муромец», помимо электрического зажигания, в авиадвигателях впервые были применены: электрическое освещение, электрический обогрев, радиосвязь и для питания этих установок — специальные генераторы, приводимые в движение от авиадвигателя или ветрянок.

В период первой империалистической войны, когда электрификация самолетов находилась в самом зачаточном состоянии, на самолетах применялся переменный ток. Это объяснялось тем, что в это время возникла крайняя необходимость в установлении связи самолета с землей и самолета с самолетом, и для этой цели стали применяться радиотелеграфные установки, работающие на переменном токе частоты 600—1200 гц. Кроме того, по мере внедрения в практику ночных полетов на самолетах появилось электрическое освещение, сначала внутреннее, затем наружное, а к концу первой мировой войны — специальное посадочное освещение. Для осветительных и нагревательных установок, которые стали применяться в связи с увеличением практики полетов в зимнее время, было безразлично, каким родом тока их питать, применение же переменного тока облегчало задачу поддержания его постоянства при применявшемся тогда последовательном соединении потребителей.

В царской России не было по существу промышленности по самолетному электрооборудованию. После Великой Октябрьской социалистической революции началось бурное развитие нашей авиации и одновременно стал увеличиваться объем устанавливаемого на самолетах электрооборудования.

После введения радиотелеграфной и радиотелефонной аппаратуры, основанной на использовании электронных ламп, возникла необходимость применения постоянного тока для питания анодных цепей ламп.

Переход электроснабжения на систему постоянного тока в наших авиационных частях начался примерно с 1919—1920 гг. Вначале напряжение постоянного тока было 8 в, но уже через сравнительно небольшой промежуток времени выявилась нерациональность применения такого низкого напряжения.

Размеры самолетов стали увеличиваться, количество потребителей электроэнергии — возрастать.

Применение низкого напряжения в 8 в приводило к необходимости иметь провода с большим поперечным сечением и большого веса. Во

избежание этого в 1923—1924 гг. напряжение бортовой сети было повышено до 12 в.

Производство генераторов постоянного тока на 8 в, а потом на 12 в, а также всей электрической системы батарейно-генераторного зажигания было организовано на заводе им. Козицкого. С 1930 г. напряжение бортовой сети на самолетах было повышено до 24 в.

Мощность первых типов генераторов постоянного тока составляла 200—300 вт.

В 1925—1926 гг. на самолетах стали применяться электрические методы для измерения неэлектрических величин — электрические тахометры, термометры, а затем бензинометры, газоанализаторы и т. п.

Вследствие того что количество потребителей электрической энергии непрерывно возрастало, на самолетах потребовалось устанавливать не один, а два или несколько параллельно работающих генераторов постоянного тока с использованием в качестве резервного и буферного источника энергии аккумуляторной батареи.

Уже в 30-х годах на наших отечественных самолетах стала внедряться механизация, при которой предпочтение отдавалось пневматическому, гидравлическому или чисто механическому силовому приводу различных агрегатов, и только на некоторых самолетах применялись электрические стартеры для запуска авиадвигателей, электропривод шасси, посадочных щитков.

Переломным этапом в развитии электрификации самолетов, в особенности привода, явилось создание в Советском Союзе в 1939 г. пикирующего бомбардировщика Пе-2 конструкции В. М. Петлякова, на котором впервые в истории авиации были широко применены дистанционно управляемые силовые электромеханизмы для привода почти всех ответственных органов и агрегатов самолета. На этом самолете были установлены электромеханизмы для привода шасси, стабилизатора, посадочных щитков, управления радиаторами, триммерами, скоростями нагнетателя и др.

Этот смелый переход на электрическое силовое управление весьма ответственными органами самолета полностью себя оправдал во время Великой Отечественной войны. Аналогичные электромеханизмы стали широко внедряться на самолетах США, Англии и Германии начиная с 1941—1942 гг., т. е. лишь спустя 3 года после создания самолета Пе-2.

Дальнейшее развитие в области электрификации самолетов было вызвано значительным увеличением количества потребителей электроэнергии. На самолетах стали устанавливаться связи и командные радиостанции больших мощностей, радионавигационное оборудование, радиоальтиметры, радиолокационное оборудование, электрифицированные винты изменяемого шага, электрифицированные пулеметные и пушечные турели, электромагнитные спуски, электробомбосбрасыватели, электрические синхронизаторы стрельбы через винт, счетчики патронов, автоматы управления турбокомпрессором, регуляторы температуры, вентильяторы, лебедки, электрические противообледенители и т. п.

В связи с увеличением мощности и количества потребителей электрической энергии на самолете производство, передача, распределение и преобразование электрической энергии значительно усложнились.

Развитие электрификации самолетов можно наглядно проследить по графикам роста установленной мощности на самолете (кривая 1 на фиг. 1) и длины проводов самолетных электрических сетей (кривая 2 на фиг. 1).

Выше было указано, что впервые переменный ток был применен на русских самолетах на заре развития авиации. В дальнейшем более

целесообразной оказалась система постоянного тока, которая используется и теперь на большинстве самолетов. Но за последние годы снова возникла необходимость в переменном токе, так как на самолетах появились многочисленные потребители электрической энергии, требующие питания переменным током. Поэтому наряду с постоянным током на современных самолетах применяется и переменный.

На самолете «Максим Горький» (1934) впервые широко был применен трехфазный переменный ток 50 гц напряжения 120 в. Общая мощность потребителей постоянного и переменного тока составляла 31,6 квт. Для питания электрооборудования были спроектированы и изготовлены два типа электростанций с двигателями внутреннего сгорания на 3000 об/мин, которые приводили во вращение два трехфазных генератора переменного тока мощностью 3 и 5,5 ква, напряжения 120 в и два генератора постоянного тока мощностью 3 и 5,8 квт, напряжения 27 в.

Переменный ток на этом самолете использовался главным образом для приведения в действие печатного станка, питания радиооборудования и на бортовые нужды.

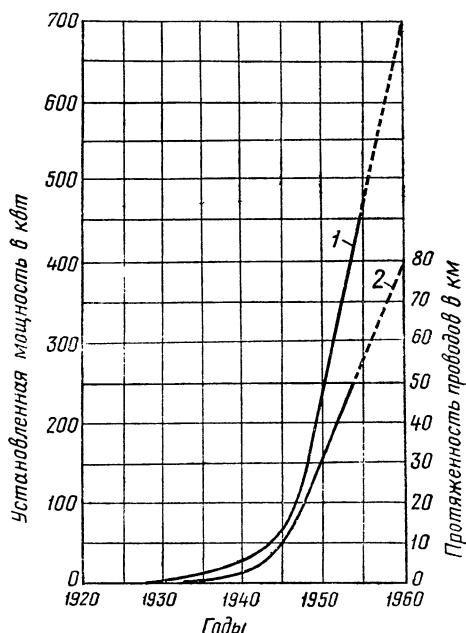
В связи с расширением электрификации самолетов, естественно, возник вопрос о снижении веса электрооборудования и повышении надежности его работы, особенно на больших высотах. Как показали исследования, в случае использования на самолетах переменного тока в качестве основного вида электрической энергии более целесообразно иметь напряжение 200/115 в и частоту 400—500 гц.

Развитие реактивной авиации потребовало внедрения ряда специальных электрических машин и аппаратов. Появились новые электрические приборы, аппараты, механизмы для управления агрегатами реактивного двигателя и другими устройствами на реактивных самолетах. В реактивной авиационной технике в гораздо больших размерах стала применяться и автоматика на основе широкого использования электрической энергии.

Широкое внедрение вертолетов выдвинуло ряд новых задач в области электрооборудования этих летательных устройств.

В последние годы проблема использования электрической энергии для тяги на самолетах и вертолетах снова приобрела большую актуальность.

Таким образом, идея электродвижения самолетов, выдвинутая впервые русским электротехником А. Н. Ладыгиным, которая не могла быть практически осуществлена в период жизни ее автора вследствие низкого уровня техники, теперь благодаря прогрессу в области специального электромашиностроения и авиационной техники становится вполне реальной.



Фиг. 1. Рост установленной мощности и протяженности проводов на самолетах.

Возможность создания в недалеком будущем специальных атомно-энергетических установок для летательных аппаратов открывает еще более широкие перспективы для использования электрической энергии в качестве основной движущей силы.

§ 3. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ САМОЛЕТОВ

Все электрическое оборудование самолетов в зависимости от назначения каждого его элемента может быть подразделено на ряд основных групп, а именно:

1. Источники и преобразователи электрической энергии, к которым относятся: электрические генераторы постоянного и переменного тока; химические источники тока; преобразователи электрической энергии, включающие в себя не только электромашинные преобразователи всех типов, но и выпрямители, трансформаторы, умножители напряжения и т. п. устройства.

2. Потребители электрической энергии, в число которых входят:

а) электрические двигатели, аппараты и приборы, служащие для приведения в действие и управления исполнительными механизмами, агрегатами и различными органами самолета;

б) осветительные и светосигнальные устройства;

в) нагревательные, обогревательные, противообледенительные устройства и т. п.;

г) средства связи и радиоаппаратура самолета;

д) контрольно-измерительная аппаратура и приборы, принцип действия которых основан на использовании электрической энергии: электрические термометры, тахометры, газоанализаторы, бензинометры, компасы и т. п.

3. Система передачи и распределения энергии, составными элементами которой являются:

а) электрическая (бортовая) сеть, включающая в себя различные провода и жгуты;

б) коммутационная, защитная, регулирующая аппаратура, сетевые фильтры и пр.;

в) контрольно-измерительные приборы, при помощи которых ведется наблюдение за режимом работы электрической системы самолетов;

г) монтажное и установочное оборудование (разъемы, распределительные устройства, пульта и т. п.).

4. Система электрического зажигания, которая обеспечивает как пусковое, так и рабочее зажигание горючей смеси в авиадвигателях.

5. Устройства для обеспечения электрической безопасности как обслуживающего персонала, так и всего оборудования и защиты элементов электрооборудования от внешних влияний.

§ 4. ОСОБЕННОСТИ УСЛОВИЙ РАБОТЫ САМОЛЕТНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Как отдельные элементы, так и весь комплекс сложного и разнообразного электрооборудования летательных аппаратов находится в условиях и обстановке, которые значительно отличаются от таковых для наземного электрооборудования, причем самолетное электрооборудование работает в более неблагоприятных условиях, чем наземное.

Современные летательные устройства должны совершать полеты независимо от погоды, в сложных метеорологических условиях, на весьма больших высотах. Так, например, транспортные самолеты поднимаются на высоту 10—12 км для того, чтобы летать с большей скоростью и в более спокойной атмосфере. По тем же причинам и по соображениям тактического порядка военным самолетам приходится совершать полеты на высотах 15—20 и даже более 20 километров. Телеуправляемые летательные аппараты могут перемещаться в земной атмосфере на высотах более 100 км. Как известно, свойства атмосферы находятся в зависимости от высоты, с увеличением которой понижается давление, уменьшается плотность и изменяется температура.

В табл. 1 приведены данные о физических параметрах так называемой Стандартной Атмосферы (СА). Эта таблица составлена на основе статистического материала, полученного в результате многочисленных исследований состояния атмосферы на различных высотах в определенных широтах. В СА установлено следующее распределение температуры, приближающееся к среднему состоянию земной атмосферы: у поверхности земли $T_0 = 273 + 15^\circ = 288^\circ \text{K}$; на высотах до 11 км (область тропосферы) температура убывает на $0,65^\circ \text{K}$ на каждые 100 м, что аналитически выражается так: $\vartheta_H = (15 - 6,5 H)^\circ \text{C}$, где H — высота в км; на высотах от 11 до 30 км (область стратосферы) температура принимается постоянной, равной $T = 216,5^\circ \text{K}$ или $\vartheta_H = -56,5^\circ \text{C}$.

При определении давления воздуха для нижних слоев атмосферы ($H_m \leq 11\,000 \text{ м}$) пользуются формулой

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{288 - 0,065 H_m}{288} \right)^{5,2561},$$

где p и p_0 — давления воздуха на верхнем и нижнем уровнях в мм рт. ст.

Для верхнего изотермического слоя связь между высотой и давлением выражается так:

$$H_m - 11\,000 = 14\,600 (\lg p_{11\,000} - \lg p).$$

При отсутствии таблицы СА значение относительной плотности воздуха для высот H до 20 км можно подсчитывать по формуле, предложенной В. П. Ветчинкиным:

$$\frac{\rho_H}{\rho_0} = \frac{20 - H \text{ км}}{20 + H \text{ км}},$$

где H км — высота в километрах.

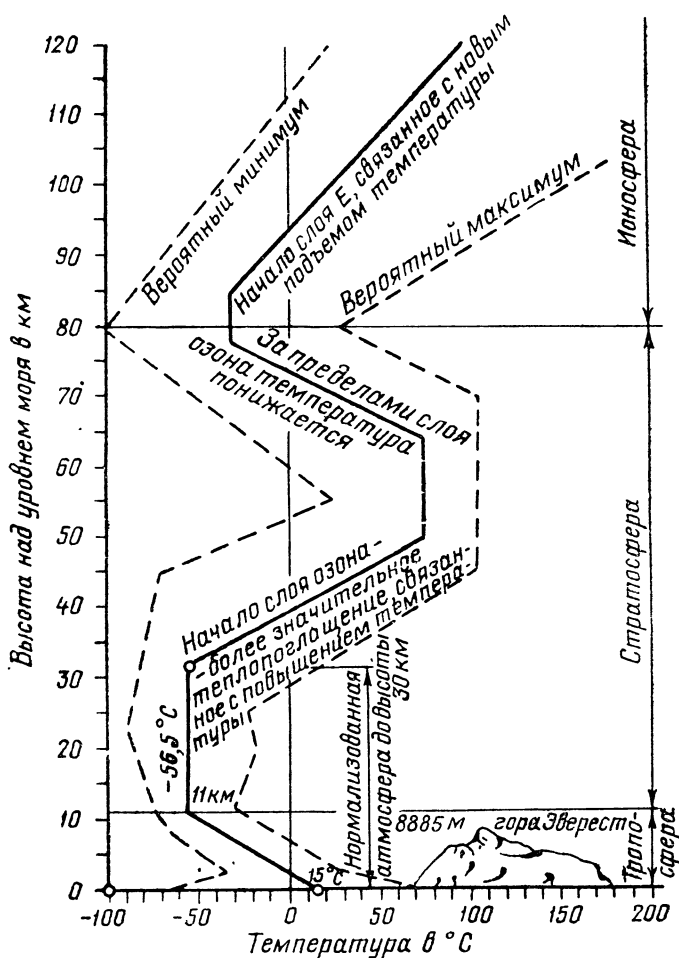
Таблица 1

Стандартная атмосфера

Высота в м	Барометрическое давление		Относительное давление $\frac{p_H}{p_0}$	Температура T_H °K	Относительная температура $\frac{T_H}{T_0}$	Температура ϑ_H °C	Весовая плотность γ_H кг/м³	Массовая плотность ρ_H $\frac{\text{кг сек}^2}{\text{м}^3}$	Относительная плотность $\Delta = \frac{\rho_H}{\rho_0}$
	p_H мм рт. ст.	p_H кг/м²							
0	760,0	10332,3	1,0000	288,00	1,0000	15,00	1,2255	0,124966	1,00000
2000	596,18	8105,2	0,7845	275,00	0,9549	2,00	1,0068	0,102664	0,82154
4000	462,21	6283,8	0,6082	262,00	0,9097	-11,00	0,8193	0,083543	0,66853
6000	353,73	4809,0	0,4654	249,00	0,8646	-24,00	0,6597	0,067273	0,53833
8000	266,85	3627,9	0,3511	236,00	0,8194	-37,00	0,5251	0,053546	0,42848
10 000	198,12	2693,5	0,2607	223,00	0,7743	-50,00	0,4126	0,042073	0,33668
11 000	169,60	2305,7	0,2232	216,5	0,7517	-56,5	0,3638	0,037086	0,29667
12 000	144,84	1969,1	0,1906	216,5	0,7517	-56,5	0,3107	0,031681	0,25352
14 000	105,64	1436,2	0,1390	216,5	0,7517	-56,5	0,2266	0,023106	0,18490
16 000	77,05	1047,5	0,1014	216,5	0,7517	-56,5	0,1653	0,016853	0,13486
18 000	56,19	764,0	0,0739	216,5	0,7517	-56,5	0,1205	0,012291	0,09836
20 000	40,99	557,2	0,0539	216,5	0,7517	-56,5	0,0879	0,008965	0,07174

На фиг. 2 приведена диаграмма, характеризующая температурные свойства атмосферы земного шара.

При снижении давления атмосферного воздуха с увеличением высоты полета уменьшается электрическая прочность воздуха, и на высоте 15 км она приблизительно в 2,5—3 раза меньше, чем у земли. При этом электрическая прочность воздуха почти не зависит от частоты тока в пределах изменения ее от 50 до 400—500 гц.



Фиг. 2. Физические свойства земной атмосферы.

Как показывают исследования, с подъемом на высоту увеличивается продолжительность горения электрической дуги в коммутационной аппаратуре.

Эксплуатация электрооборудования при низких температурах связана с возможностью появления дефектов механического, электрического и химического характера. При низких температурах может происходить значительное снижение механической прочности отдельных деталей электрических машин, аппаратов, приборов и даже их разрушение, а также могут возникать механические перенапряжения, нарушающие нормальную работу отдельных элементов оборудования. Вследствие замерзания смазочных веществ (в тех случаях, когда не применяются специальные

незамерзающие смазки) создаются большие моменты сопротивления в механизмах и агрегатах, затрудняющие приведение их в движение. При понижении температуры обычные изолирующие материалы (каучук, эбонит и т. п.) становятся хрупкими, и в них появляются трещины. Электролитические конденсаторы и аккумуляторные батареи теряют свою работоспособность вследствие увеличения внутреннего сопротивления или замерзания электролита.

При полетах самолета с большими скоростями (свыше 1М) на больших высотах, несмотря на пониженную температуру атмосферного воздуха, происходит нагрев корпуса самолета вследствие трения поверхности его о воздух, что может вызвать недопустимые повышения температуры и внутри самолета.

Эксплуатация электрооборудования при повышенных температурах также может приводить к появлению дефектов. В частности, ухудшаются электрические свойства изолирующих материалов, увеличивается коррозия металлических деталей, ухудшаются условия охлаждения, снижается механическая прочность и т. п.

Наконец, изменения температуры в широких пределах приводят к изменениям сопротивления обмоток, упругих свойств пружин и линейных размеров отдельных деталей реле, регуляторов и других аппаратов, в результате чего меняется их настройка, что может приводить в отдельных случаях к нарушению нормальных условий работы.

При работе в высотных условиях вследствие уменьшения влажности воздуха износ щеток электрических машин значительно увеличивается. Износ обычных электрографитных щеток при плотности водяных паров 0,1 мм рт. ст., например, на высоте около 8—9 км в 30 раз больше, чем на земле. Только применением специальных материалов удается увеличить срок службы щеток самолетных электрических машин при работе их в высотных условиях.

С подъемом на высоту, несмотря на понижение температуры окружающей атмосферы, ухудшается теплоотдача электрических машин, и если не принимать специальных мер для охлаждения, то на высоте 10 км генераторы могут отдавать только 20—25% номинальной мощности.

Таким образом, физико-химические свойства атмосферы, зависящие от высоты, оказывают весьма существенное влияние на все электрическое оборудование самолетов.

Так как на современных самолетах можно совершать переход от одной высоты на другую в течение весьма короткого промежутка времени и производить полеты при различных состояниях погоды, то атмосферные условия для самолетного электрооборудования изменяются довольно быстро и в широком диапазоне, это оказывает также неблагоприятное влияние.

Из всего сказанного выше следует, что как при конструировании, так и при эксплуатации самолетного оборудования необходимо строго учитывать все разнообразие влияния земной атмосферы при полетах самолетов с различными скоростями, особенно со сверхзвуковыми.

Другим весьма важным фактором, влияющим не только на работу, но и на прочность самолетного электрооборудования, являются причины механического характера — вибрации, толчки, удары, динамические силы и механические перегрузки.

Особенно сильные вибрации вызываются вращением коленчатых валов и винтов, взрывами смеси в цилиндрах, возвратно-поступательным движением поршней и шатунов.

Вибрации отдельных частей самолета являются одной из возможных причин повреждения самолета и его оборудования. На самолетах наблюдаются колебания как низкой частоты от 0,5 до 50 *гц*, так и более высоких частот — до 500 *гц*.

Кроме механических нагрузок от динамических сил переменного знака, вызываемых вибрациями, на самолете могут возникнуть значительные динамические силы одного направления вследствие ускорений при пикировании, виражах самолета, разбегах во время взлета и торможении при посадке.

Большим динамическим воздействиям подвергается самолетное электрооборудование при толчках, которыми всегда сопровождается взлет и посадка самолета.

На военных самолетах стрельба из пулеметов и пушек также вызывает сотрясения, передающиеся на отдельные элементы электрического оборудования самолетов.

Следующим весьма важным фактором, который утяжеляет условия эксплуатации электрооборудования на самолетах, являются коррозия и вредное химическое действие присутствующих в окружающей атмосфере посторонних примесей влаги, паров бензина, масла и т. п.

Самолеты во время полетов могут совершать различные эволюции, поэтому установленным на самолетах электрическим машинам и устройствам приходится выполнять свои функции при различных положениях в пространстве. Это обстоятельство предъявляет особые требования к конструкции всех устройств.

Вследствие того что все элементы электрооборудования, расположенные на самолете, находятся в непосредственной близости друг к другу, могут возникать взаимные влияния (помехи), нарушающие нормальную работу. Так, например, расположение неподалеку от магнитных компасов проводов, по которым течет электрический ток, вызывает девиацию компаса.

Работа системы электрического зажигания, вибрационных регуляторов напряжения, искрения на коллекторе электрических машин и пр. сопровождаются возникновением токов высоких частот и излучением электромагнитных волн, которые создают большие помехи для радиотелефонного и телеграфного приема, если не приняты соответствующие меры защиты.

В некоторых отсеках фюзеляжа самолета скапливаются газы и жидкости, способные к воспламенению и взрыву. Эти взрыво- и пожароопасные смеси могут соприкасаться с элементами электрооборудования, работа которых сопровождается или чрезмерным нагревом отдельных частей или образованием искр, разрядов и т. п. В этих случаях должны быть приняты все меры для того, чтобы электрооборудование не явилось причиной пожара или взрыва.

Вместе с тем при всех этих тяжелых условиях работы, обычных для самолетных установок, электрооборудование должно действовать с максимальной степенью надежности, причем как вся система электрооборудования, так и ее отдельные элементы должны иметь минимальный вес и габариты.

Безотказность работы самолетных электрических установок в любых условиях полета является совершенно обязательным требованием. Отказ в действии какой-либо даже мелкой детали электрооборудования, например, выключателя, часто влечет за собой выход из строя или временное прекращение работы целых агрегатов, что может привести к тяжелым последствиям.

Размещение всего сложного и многообразного электрооборудования на самолете представляет довольно трудную задачу. Помимо удовлетворения требованиям удобства и доступности осмотра, ухода, монтажа и демонтажа отдельных элементов электрооборудования, приходится считаться еще с ограниченностью объема кабин современных самолетов легкого и среднего типов, что предъявляет жесткие требования к габаритам элементов электрооборудования.

Применение на самолетах электрических установок с напряжением свыше 60 в относительно корпуса самолета, а также вынужденная необходимость размещения большого количества элементов сложного электрооборудования в ограниченном пространстве внутри самолета заставляет обращать особое внимание на обеспечение электрической безопасности, на строгое соблюдение правил защиты от возможности опасных прикосновений к токоведущим и металлическим частям, могущим оказаться под напряжением вследствие повреждения изоляции.

§ 5. ОСНОВНЫЕ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЮ САМОЛЕТОВ

Важность и сложность функций, выполняемых всем комплексом электрического оборудования самолета, и специфичность условий его эксплуатации предъявляют к нему весьма высокие требования.

Основными тактико-техническими требованиями к электрооборудованию самолета являются:

1) надежность и безотказность действия в любых условиях полета: при различных скоростях как на высоте, так и у земли, при эволюциях самолета, полетах днем, ночью, в облаках, при взлете и посадке самолета;

2) минимальный вес и габариты без ущерба надежности электрооборудования в работе и удобству эксплуатации;

3) высокая прочность (механическая, электрическая и термическая) и химическая стойкость;

4) удобство и безопасность в обращении; безопасность в отношении пожара, взрыва;

5) независимость работы электрооборудования от положения относительно горизонтали, которое может меняться при различных эволюциях самолета в полете;

6) независимость работы электрооборудования от давления, температуры, влажности окружающей среды и от присутствия паров бензина и масла, антифриза и кислот; для самолетов с реактивными двигателями — от присутствия паров соответствующих компонентов топлива;

7) малая уязвимость и большая живучесть;

8) отсутствие мешающих действий электрических установок на работу радиооборудования, магнитных компасов и т. п., отсутствие взаимного влияния устройств электрооборудования;

9) быстрая готовность к действию;

10) простота ухода, эксплуатации, возможность быстрой смены деталей, монтажа;

11) взаимозаменяемость, унификация отдельных узлов и деталей;

12) достаточный срок службы.

Многие из этих требований не нуждаются в особых обоснованиях. Следует отметить, что некоторые из этих требований могут оказаться противоречивыми, тогда конструктор должен найти компромиссное решение, учтя наиболее существенные требования для данного конкретного случая.

Особенно противоречивыми в ряде случаев оказываются требования, с одной стороны, чрезвычайно ограничивающие вес и габарит, с другой — настаивающие на максимальной прочности, тем более что в применении к электрическому оборудованию самолетов понятие максимальной прочности особенно широко и ставит перед конструктором многосторонние и подчас совершенно новые задачи.

К числу требований механической прочности в первую очередь следует отнести требования вибропрочности и виброустойчивости.

Под *вибропрочностью* понимается способность объекта выдерживать самолетные вибрации в течение срока службы без механических повреждений и с сохранением своих параметров.

Под *виброустойчивостью* понимается способность объекта не вступать в резонансные колебания в пределах частот, которые могут иметь место на самолете, и сохранять свои параметры.

Согласно установленным нормам все элементы бортового электрооборудования подвергаются специальным испытаниям на вибропрочность и виброустойчивость, а также в отношении действия ускорений.

К числу специфических требований, относящихся к механической прочности электрооборудования на боевых самолетах, следует прибавить также требование, чтобы материалы, применяемые для изготовления отдельных элементов его, не давали при простреле мелких острых осколков, могущих поранить экипаж самолета. Точно так же вся проводка на самолете должна быть выполнена так, чтобы провода могли несколько выгибаться и, таким образом, в известной мере предотвратить возможность разрыва от деформации конструкции самолета.

Основное требование, относящееся к химической устойчивости электрооборудования, заключается в том, что его металлические части не должны подвергаться коррозии. Так как самолеты длительное время находятся на открытом воздухе, отдельные элементы и детали его электрооборудования подвергаются воздействию влаги. Во время высотных полетов на отдельных деталях оборудования и металлических частях самолета может также конденсироваться влага, а самолеты морской авиации, кроме того, подвергаются воздействию соленой воды, — все это вызывает сильную коррозию металлических и, в частности, алюминиевых частей. Поэтому необходимо применять материалы, устойчивые против коррозии (например, кадмированное железо), и алюминиевые поверхности всех деталей, соприкасающихся с воздухом, покрывать антикоррозийными составами.

Кроме того, пары бензина и масла в случае проникновения их внутрь элементов электрооборудования оказывают весьма вредное влияние на изолирующие материалы (изоляция проводов, пластические массы), способствуя снижению их изолирующих, а иногда и механических свойств и вызывая преждевременное разрушение изоляции.

Самолетное электрооборудование должно нормально работать в условиях 95—98 %-ной относительной влажности наружного воздуха. Кроме того, электрооборудование, устанавливаемое снаружи самолета, по конструктивному оформлению должно быть таким, чтобы была исключена возможность попадания в него дождя и снега, а также масла, керосина и бензина.

Требование пожарной безопасности, кроме обычных мер, предупреждающих возможность возникновения пожара, предусматривает применение специальных огнестойких материалов или таких, для которых скорость горения в горизонтальном направлении не превышает примерно 100 мм/мин.

Безопасность в отношении взрыва является условием, к выполнению которого необходимо стремиться, но решение этого вопроса в полной мере представляет во многих случаях весьма трудную конструктивную задачу. Под взрывобезопасностью понимается возможность локализации взрыва внутри объекта без каких-либо вредных последствий для сопряженной с объектом системы.

Работа системы зажигания, пульсация напряжения на коллекторе генератора, вибрирующие контакты регуляторов и т. п. — все это вызывает появление токов высокой частоты и излучение электромагнитных волн и тем самым мешает радиоприему. Эти помехи могут проникать в приемник по проводам через цепь накала или через антенну вследствие излучения их источниками помех. Увеличение чувствительности установленных на самолетах радиоприемных устройств требует все более надежного устранения этих помех.

Наконец, создаваемые отдельными объектами и проводами магнитные поля могут влиять на показания измерительных приборов, компасов и т. п., вследствие чего необходимы специальные мероприятия по защите от этих явлений или по их локализации.

Требования быстрой готовности к действию, простоты ухода, эксплуатации, монтажа и замены отдельных деталей элементов и целых узлов понятны сами собой и в дополнительных разъяснениях не нуждаются. Здесь следует только подчеркнуть особую важность этих требований для боевых самолетов при эксплуатации их в полевых условиях.

Глава I

ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА

§ 1.1. ПРИМЕНЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА В АВИАЦИИ

В современной авиации одним из источников электрической энергии постоянного тока служат *химические гальванические элементы*, среди которых наибольшее распространение получили так называемые аккумуляторы.

Аккумуляторы, как известно, представляют собой гальванические элементы, в которых легко осуществляется обратимость электрохимических процессов. Благодаря такой особенности эти элементы могут не только отдавать электрическую энергию во внешнюю цепь, но и накапливать, сохранять (аккумулировать) энергию, если таковая подводится к элементу от постороннего источника тока.

Химические гальванические элементы с трудно обратимыми реакциями, или так называемые *первичные элементы*, находят в авиации ограниченное применение; эти элементы обладают малыми запасами электрической энергии и после разряда делаются практически непригодными для дальнейшего использования.

Авиационные аккумуляторы изготавливаются двух видов: для установки и использования на самолетах (самолетные аккумуляторы), для использования только на земле, при аэродромном обслуживании самолетов (аэродромные аккумуляторы).

Самолетные аккумуляторы в зависимости от типа самолета предназначаются для питания:

1) стартеров и аппаратуры зажигания при автономном запуске авиадвигателей (поршневых и реактивных);

2) отдельных потребителей электрической энергии на самолете во время параллельной работы с генераторами постоянного тока и покрытия пиков тока, превышающих максимально допустимую нагрузку генераторов;

3) жизненно важных потребителей во время полета при выходе генераторов из строя;

4) электрических установок при взлете и посадке, а также при рулении самолета по аэродрому, когда генераторы отключены от сети;

5) потребителей энергии на стоянках самолета: для освещения, при опробовании и проверке маломощных установок, при проведении предполетного и послеполетного осмотров, в случаях отсутствия на аэродроме наземных источников тока, необходимых для указанных выше целей;

6) радиостанций при вынужденной посадке.

Следует отметить, что на современных тяжелых самолетах с большим количеством потребителей электрической энергии аккумулятор при выходе из строя генератора в состоянии обеспечить энергией только не-

большую часть электрооборудования самолета, жизненно важных потребителей, прекращение работы которых ведет к аварии.

На некоторых самолетах устанавливаются вспомогательные генераторные агрегаты, в этом случае аккумулятор используется для питания стартера при запуске бензинового двигателя, приводящего во вращение вспомогательный генератор.

Аэродромные аккумуляторы предназначаются:

а) для питания самолетных потребителей электроэнергии на стоянках при проверке электрооборудования и при проведении предполетного и послеполетного осмотров;

б) для питания электрических стартеров при запуске поршневых и реактивных двигателей.

Кроме того, в авиации широкое применение аккумуляторы находят для питания наземных радиостанций, осветительных устройств, переносных фонарей и т. п. целей.

В качестве самолетных и аэродромных аккумуляторов в настоящее время используются главным образом кислотные (свинцовые) аккумуляторы.

За последнее время для запуска авиадвигателей стали находить применение, помимо кислотных аккумуляторов, щелочные (серебряно-цинковые) аккумуляторы, самолетные типы которых имеют значительно меньшие веса и габариты по сравнению с кислотными. Другие виды щелочных аккумуляторов — железоникелевые и кадмиево-никелевые — находят применение в основном для питания некоторых радиоустановок, переносных фонарей и т. п. и лишь в редких случаях используются для запуска авиадвигателей. Аккумуляторы и гальванические элементы устанавливаются также и на различных телеуправляемых беспилотных летательных объектах, где они зачастую являются единственными источниками электрической энергии.

Ниже приводятся сведения о наиболее распространенных авиационных химических источниках тока.

Авиационные аккумуляторы выполняются в виде батарей, состоящих из группы последовательно соединенных элементов. Все батареи имеют условные обозначения в виде цифр и букв, которые служат для указания числа элементов, номинальной разрядной емкости (в амперчасах) и типа аккумулятора.

Первые цифры указывают на число элементов в батарее, цифры после букв — номинальную емкость батареи при разряде в течение 10 или 5 часов. Буквы означают: А — авиационный, С — стартерный, М — модернизированный, АО — аэродромный.

На современных самолетах отечественного производства применяются свинцовые аккумуляторы нескольких типов.

Наиболее широкое распространение в настоящее время имеют аккумуляторные батареи 12-А-30, 12-АО-50, 12-САМ-28, 12-САМ-53.

Щелочные серебряно-цинковые самолетные аккумуляторы емкостью 45 а-ч имеют обозначения 15-СЦС-45.

Щелочные кадмиево-никелевые аккумуляторы, выпускаемые отечественной промышленностью и предназначенные для питания радиоустройств, имеют маркировку, в которой первая буква указывает на цепь питания, например, НКН и АКН: Н — для питания цепи накала радиоламп, А — для питания анодных цепей, КН — кадмиево-никелевые.

Авиационные аккумуляторы должны нормально работать при следующих условиях:

а) при атмосферном давлении окружающей среды вплоть до 35 мм рт. ст.;

- б) при изменении температуры от $+50$ до -60°C (с принятием мер для их охлаждения или утепления);
- в) при вибрации в местах установки с частотами от 16 до 30 гц с амплитудой колебаний 1,0—1,5 мм;
- г) при всех скоростях полета, различных эволюциях и положениях самолета в пространстве;
- д) в течение гарантийного срока службы, исчисляемого по времени (1—2 года) или по числу зарядно-разрядных циклов.

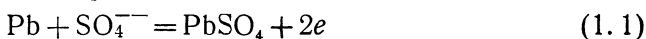
§ 1.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СВИНЦОВОГО АККУМУЛЯТОРА

Свинцовые аккумуляторы, принцип устройства которых впервые был предложен французским физиком Планте (1859), получили широкое распространение в авиации.

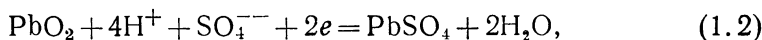
Каждый элемент свинцового аккумулятора состоит из двух электродов (положительного и отрицательного), электролита и сосуда, заключающего в себе оба электрода и электролит.

Активным веществом положительного электрода в заряженном аккумуляторе является перекись свинца PbO_2 , а отрицательного — губчатый (металлический) свинец Pb . Электролитом служит 20—30 % -ный водный раствор серной кислоты H_2SO_4 .

Таким образом, в рабочем состоянии свинцовый (кислотный) аккумулятор представляет собой гальванический элемент. На обоих электродах этого элемента протекают реакции



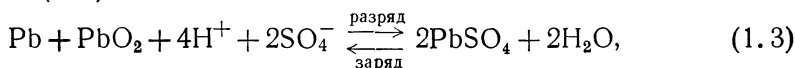
и



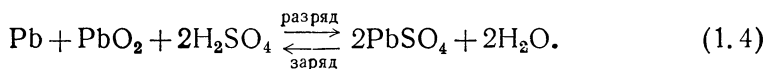
где e — свободный электрон,

при которых серная кислота реагирует со свинцом и перекисью свинца, образуя сернокислый свинец.

Суммарное уравнение токообразующей реакции в целом получается из сложения уравнений процессов, происходящих на обоих электродах, т. е. из (1.1) и (1.2):



или, как его обычно пишут в упрощенном виде,



Реакция при разряде, т. е. при отдаче электрической энергии аккумулятором, протекает согласно уравнению (1.4) слева направо, а при заряде — справа налево. Уравнение (1.4), выражающее электрохимические процессы в свинцовом аккумуляторе, часто подвергалось сомнениям, но многочисленные исследования окончательно подтвердили правильность его.

При разряде свинцового аккумулятора происходит двойная сульфатация: в сульфат переходит активное вещество как положительного, так и отрицательного электродов. Вместе с этим плотность (концентрация) электролита уменьшается, так как сульфатация электродов сопровождается образованием воды.

Из уравнения (1.2) видно, что образование воды происходит у положительного электрода, и, следовательно, плотность электролита у положительных пластин падает быстрее, чем у отрицательных.

При заряде аккумулятора ток в электролите от постороннего источника протекает от положительного электрода к отрицательному. При этом активные вещества электродов восстанавливаются. Сульфат свинца на положительном электроде переходит в перекись свинца, а на отрицательном — в губчатый свинец. Одновременно с этим образуется серная кислота, поэтому плотность электролита увеличивается. Образование серной кислоты происходит у положительного электрода, вследствие чего плотность электролита у положительного электрода растет быстрее, чем у отрицательного.

При заряде аккумулятор превращается в гальванический элемент с определенным запасом отлагающихся на электродах электрохимических активных веществ. От количества их зависит емкость аккумулятора.

Согласно теории двойной сульфатации для получения от аккумулятора 1 а-ч емкости в нем должно расходоваться (или принять участие в реакциях) следующее количество активных веществ:

свинца	3,866 г
перекиси свинца	4,463 „
серной кислоты	3,66 „

При работе аккумулятора реакции происходят главным образом на поверхности соприкосновения электролита с активной массой. Благодаря этому часть активного материала, расположенного внутри пластин, не используется при работе аккумулятора, и, следовательно, в аккумуляторах должно быть большее количество активных материалов, чем указано выше, для получения 1 а-ч емкости.

Для получения большей емкости при данном количестве активной массы, очевидно, необходимо увеличивать поверхность соприкосновения активной массы с электролитом. С этой целью желательно делать пластины по возможности тонкими и пористыми, увеличивая соответственно их число.

§ 1.3. УСТРОЙСТВО АВИАЦИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Авиационный свинцовый аккумулятор, типичная конструкция которого изображена на фиг. 1.1, состоит из следующих основных частей: электродов (положительных и отрицательных пластин), сепараторов, бака, пробок и других вспомогательных деталей.

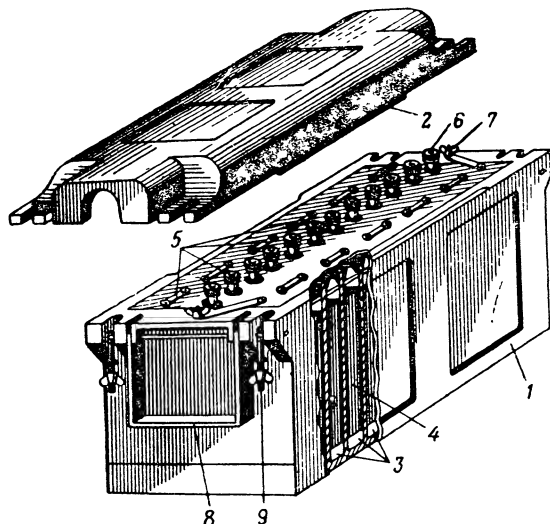
Электроды современных свинцовых аккумуляторов выполняются в виде пластин. Каждая пластина состоит из остова и слоя активной массы.

В авиационных аккумуляторах применяются решетчатые пластины, изготавливаемые из сплава свинца с примесью 6—12% сурьмы. Добавка сурьмы к свинцу делает сплав более жестким и менее подверженным разрушительному действию серной кислоты. Кроме того, из свинцово-сурьмянистых сплавов, имеющих более низкую температуру плавления, чем чистый свинец, можно делать хорошие отливки. Решетки служат остовом активных веществ.

В качестве активной массы, которая вмазывается в решетки пластин, применяются специальные пасты. Главной составной частью пасты для положительных пластин служит сурик (Pb_3O_4), а для отрицательных пластин — глет (PbO). В пасту, предназначенную для отрицательных пластин, всегда добавляется так называемый расширитель: сульфат бария, сажа, древесная мука, хлопковые очесы и т. д. Назначение расширителя — воспрепятствовать переходу мелкокристаллического свинца в крупнокристаллический, так как при таком переходе активная масса уплотняется и отстает от стенок решетки. Активные вещества пластин (перекись свинца PbO_2 для положительных пластин и губчатый свинец

Pb — для отрицательных) получают в результате электрохимического процесса — формовки пасты.

Электродные пластины, подвергнутые формовке, в дальнейшем собирают в комплекты.



Фиг. 1.1. Конструкция аккумулятора 12-A-30.

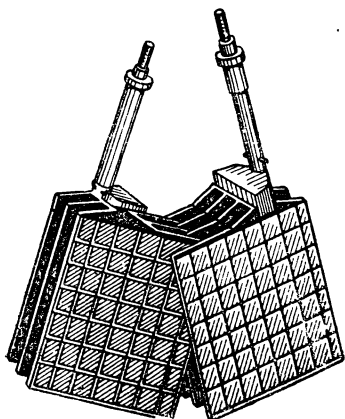
1—моноблок, 2—крышка, 3—ячейки элементов в моноблоке, 4—пластины элемента, 5—межэлементные перемычки, 6—пробка, 7—зажим для присоединения аккумулятора, 8—ручка для переноски аккумулятора, 9—откидной винт с барашком для крепления крышки аккумулятора.

Число отрицательных пластин каждого элемента свинцовых аккумуляторов всегда на единицу больше, чем положительных, так как положительные пластины легко коробятся при нагрузке их с одной стороны.

Количество пластин в аккумуляторе большой емкости получается весьма значительным, например, в аккумуляторе 12-АО-50 девять положи-

жительных и 10 отрицательных пластин. Пластины в комплекты соединяют припайванием приливов пластин к специальным перемычкам, которые называются баретками. Комплекты положительных и отрицательных пластин вставляются один в другой так, чтобы разноименные пластины чередовались между собой (фиг. 1.2). Между пластинами вставляют сепараторы для устранения замыкания между пластинами.

Сепараторы представляют собой пронашиваемые для электролита изоляционные прокладки, разделяющие положительные и отрицательные пластины. Сепараторы для свинцовых аккумуляторов изготавливаются из кислотоупорных материалов, из числа которых нашли применение главным



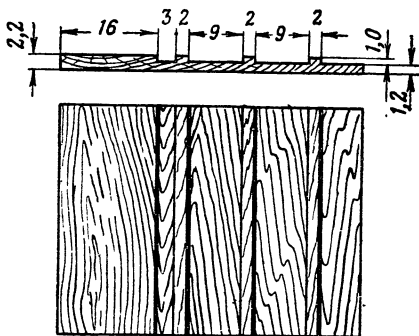
Фиг. 1.2. Сборка блока пластин.

образом микропористый эбонит, перфорированный листовой целлулоид, а также дерево (ольха или кедр).

Сепараторы из микропористого эбонита используются в самолетных аккумуляторах типа 12-A и 12-САМ. Деревянные сепараторы применяются в аккумуляторах типа 12-АО.

Сепараторы выполняются обычно слегка шероховатыми с одной стороны и ребристыми с другой (фиг. 1.3). При сборке их устанавливают ребристой стороной к положительным пластинам для более легкого доступа электролита. Толщина сепараторов не превышает 1,2—2,0 мм.

Баки авиационных аккумуляторов изготавливаются обычно из эбонита, целлулоида, прозрачных пластмасс и других кислотоупорных материалов. Баки из целлулоида или прозрачных пластмасс несколько легче эбонитовых и удобны для наблюдения за состоянием пластин. Материалы для баков должны быть нерастворимыми в серной кислоте, являться хорошими изоляторами, иметь малый удельный вес и обладать достаточной механической прочностью. Аккумуляторные баки выполняются в виде индивидуальных сосудов для каждого элемента (аккумуляторы типа 12-АО) или в виде моноблочной (многоячеековой) конструкции (аккумуляторы типа 12-А и 12-САМ). Сосуд или ячейка для одного элемента имеет форму прямоугольного параллелепипеда. Днище внутри сосуда элемента или ячейки моноблочного бака имеет трапециевидные выступы в виде призм, на которые опираются электродные пластины. Такое устройство предохраняет пластины от короткого замыкания, могущего произойти от постепенного накопления на дне сосуда частиц активной массы положительных пластин, выпадающих в процессе эксплуатации.



Фиг. 1.3. Деревянный сепаратор.

Сверху сосуд или ячейка каждого элемента закрывается крышкой с тремя отверстиями, из которых два служат для вывода штырей бареток, а одно используется для наполнения аккумулятора кислотой и для выхода газов. Это отверстие закрывается пробкой.

Аэродромные аккумуляторы типа АО имеют отдельные сосуды для каждого элемента, которые при сборке батареи помещаются в общий деревянный ящик.

Самолетные аккумуляторы с целью уменьшения веса и габаритных размеров выполняются с моноблочными баками.

Пробки. Для закрытия отверстий в крышках элементов аккумулятора применяются пробки, которые, с одной стороны, должны служить для бесперебойного выпуска газов при работе аккумулятора и, с другой стороны, обеспечивать невыливаемость электролита при переносе их, тряске, наклонах и эволюциях самолета.

У аккумуляторов, предназначенных для самолета-истребителя, пробки должны обеспечивать невыливаемость электролита и при любом положении аккумулятора в пространстве.

При хранении и транспортировке новых, еще не залитых электролитом аккумуляторов, когда не происходит никакого газовыделения, применяются глухие пробки, в которых отсутствуют отверстия для выхода газов. Глухие пробки принято окрашивать в красный цвет.

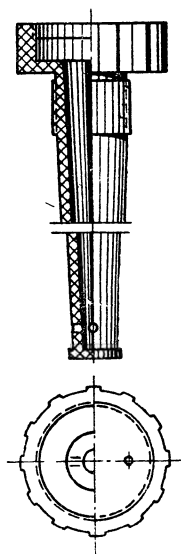
Рабочие пробки снабжаются вентиляционными каналами, но эти каналы не рассчитаны на выпуск большого количества газов, выделяющихся в конце нормального заряда, и поэтому при заряде аккумулятора на зарядной станции их следует вынимать.

Материалом для изготовления пробок обычно служит эбонит. Для

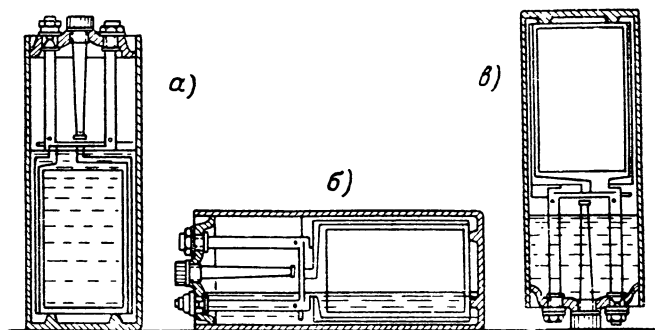
создания большей герметизации в местах соприкосновения пробки с поверхностью крышки аккумуляторов применяют резиновые шайбы.

Невыливаемость электролита может быть обеспечена применением золотниковых пробок или длинных пробок (фиг. 1.4).

Существенный недостаток длинных пробок, ограничивающий их применение на самолете, заключается в том, что наличие нерабочего верхнего пространства бака (фиг. 1.5) увеличивает объем и вес аккумулятора. Кроме того, удлинение выводных штырей связано с увеличением внутреннего сопротивления аккумулятора. Одна-



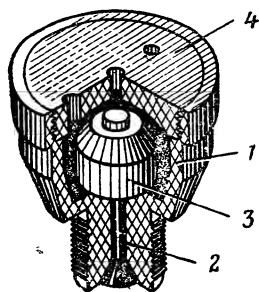
Фиг. 1.4. Длинная пробка.



Фиг. 1.5. Аккумулятор с длинной пробкой.
а—нормальное положение, б—наклон на 90°, в—перевернутое положение.

ко достоинством таких пробок является то, что они могут выпускать газы и тогда, когда аккумулятор повернут вверх дном. Такие пробки применяются на некоторых зарубежных самолетных аккумуляторах.

Для самолетных аккумуляторов типа 12-А и 12-САМ применяются золотниковые пробки (фиг. 1.6), состоящие из эбонитового корпуса 1, резинового золотника 2, заделанного в конусообразный свинцовый грузик 3, и крышки 4 с двумя отверстиями.



Фиг. 1.6. Золотниковая пробка аккумулятора типа 12-А-30.

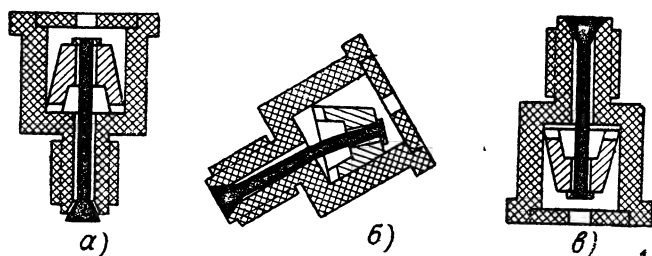
1—эбонитовый корпус, 2—резиновый золотник, 3—свинцовый грузик, 4—крышка с отверстиями.

В нормальном положении (фиг. 1.7,а) грузик давит на стержень золотника, конусообразная головка которого отходит от гнезда и открывает выход газам через кольцообразный канал между стержнем и стенками корпуса. Низ грузика имеет крестообразную шлицовку, дающую возможность свободно проходить газам в верхнюю камеру, откуда они выходят наружу через отверстие в крышке. При наклоне (фиг. 1.7,б) грузик падает на боковую стенку и вытягивает золотник, который своей головкой закрывает нижнее отверстие. При перевернутой пробке (фиг. 1.7,в) груз тянет золотник вниз, и входное отверстие плотно закрывается.

Аналогично действуют и золотниковые пробки, изображенные на фиг. 1.8

Преимущества этого типа пробок состоят в том, что они не требуют увеличения высоты бака; нижняя кромка пробки может быть расположена над самым уровнем электролита.

Недостатки золотниковых пробок заключаются в том, что в перевернутом состоянии выхода газов не происходит, и что в процессе эксплуата-

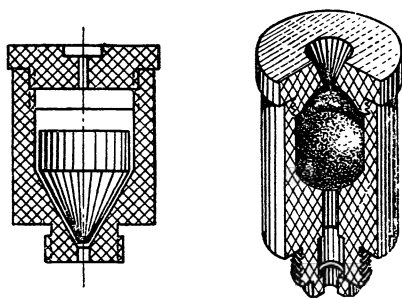


Фиг. 1.7. Действие золотниковой пробки.

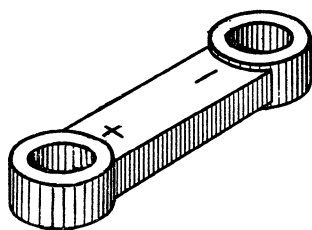
а—нормальное положение, б—наклон на 60° , в—перевернутое положение.

тации необходимо систематически промывать каналы пробки во избежание их засорения.

При сборке элементов в батарее стремятся к тому, чтобы межэлементные соединения были возможно короче.



Фиг. 1.8. Типы золотниковых пробок.



Фиг. 1.9. Межэлементное соединение.

Межэлементные соединения (фиг. 1.9) выполняются из сплава свинца с сурьмой, причем в каждом элементе выводы от электродов делаются наружу и соединения между ними располагаются выше верхней поверхности крышек.

§ 1.4. ЭЛЕКТРОЛИТ СВИНЦОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Электролитом свинцовых аккумуляторов служит водный раствор серной кислоты плотностью до $1,32 \text{ г/см}^3$ (в полностью заряженных аккумуляторах в зимнее время).

Аккумуляторная кислота, предназначенная для приготовления электролита, должна удовлетворять требованиям ГОСТ 667—53. Согласно ГОСТ эта кислота по внешнему виду должна быть бесцветной, прозрачной маслянистой жидкостью, плотностью $1,84 \text{ г/см}^3$ и иметь концентрацию в пределах 92—94%. В зависимости от сорта кислоты содержание примесей в кислоте не должно превышать количеств (в процентах), приведенных в табл. 1.1.

Наличие примесей в кислоте вредно действует на аккумулятор: вызывает ускоренный саморазряд, разрушает пластины и сепараторы.

Анализ серной кислоты на вредные примеси производится согласно ГОСТ 667—53, но для этого требуется хорошо оборудованная химическая лаборатория.

В полевых условиях весьма желательно исследовать кислоту на наиболее вредные примеси, хотя бы на хлор и железо.

Таблица 1.1

Допустимое содержание примесей
в серной кислоте в %

Название примесей	Сорт А	Сорт Б
Марганец	0,00005	0,0001
Железо	0,006	0,012
Мышьяк	0,00005	0,0001
Хлор	0,0005	0,001
Оксид азота	0,00005	0,0001
Нелетучий остаток	0,03	0,05

При испытании на хлор (Cl) к 20 см³ водного раствора кислоты плотностью 1,06 г/см³ прибавляют 5—10 капель азотной кислоты плотностью 1,2 г/см³ и около 20 капель 10%-ного раствора азотнокислого серебра (ляписа).

При допустимых количествах хлора в растворе появляется белая дымка. Большое содержание хлора вызывает сильное помутнение раствора или даже выпадение творожистого осадка.

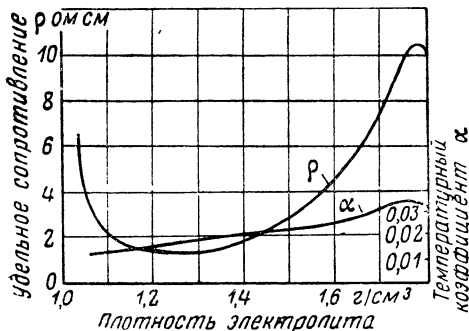
Испытание на железо проводят с раствором серной кислоты плотностью 1,385 г/см³, в который добавляют 1 см³ азотной кислоты плотностью 1,2 г/см³.

Полученный раствор нагревают до кипения. После охлаждения до комнатной температуры к раствору добавляют 2—3 см³ раствора желтой кровяной соли.

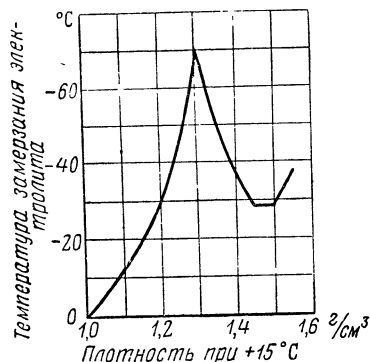
Окрашивание раствора в синий цвет указывает на наличие железа, в зеленый — никеля, кобальта или хрома, в красно-бурый — меди.

При эксплуатации допускается использование кислоты, если окрашивание получается слабоголубого или зеленоватого цвета.

Удельное сопротивление раствора серной кислоты изменяется в зависимости от его плотности и температуры.



Фиг. 1.10. Зависимость удельного сопротивления и температурного коэффициента сопротивления электролита от плотности.



Фиг. 1.11. Зависимость температуры замерзания электролита от плотности.

При плотности 1,224 г/см³ удельное сопротивление имеет минимальное значение, равное 1,33 ом·см.

При увеличении температуры удельное сопротивление раствора серной кислоты уменьшается и может быть определено по формуле

$$\rho_{\vartheta} = \rho_{18} [1 - \alpha (\vartheta - 18)], \quad (1.5)$$

где α — температурный коэффициент.

Величина α тем больше, чем больше концентрация раствора (фиг. 1.10).

На фиг. 1.11 дана зависимость температуры замерзания растворов серной кислоты от концентрации. Из кривой видно, что минимальной

температурой замерзания (-70°C) обладает раствор плотностью $1,30\text{ г/см}^3$.

Составление электролита. Одним из факторов, оказывающих влияние на надежность действия и отдачу аккумуляторов, является плотность электролита.

Для приготовления электролита необходимо применять химически чистую или аккумуляторную серную кислоту, отвечающую ГОСТ 667—53. Растворителем кислоты должна быть дистиллированная вода; при отсутствии или невозможности получить ее допускается применение чистой дождевой воды или полученной от таяния чистого снега.

Дождевая вода должна собираться в деревянные (но не железные) сосуды и процеживаться через бумагу или полотно для очистки от взвешенных частиц. Сбор дождевой воды с железных крыш не допускается. Не допускаются также сбор и таяние снега в железных сосудах.

Необходимо иметь в виду, что в дождевой воде могут находиться разные вредные примеси (аммиак, хлор, азотная кислота и др.), поэтому перед употреблением следует производить анализ этой воды.

Приготавливать электролит нужно в чистой стеклянной, керамической или свинцовой посуде.

При разведении серной кислоты в сосуд сначала наливают воду, а затем при непрерывном перемешивании ее эбонитовой или стеклянной палочкой тонкой струей небольшими порциями доливают серную кислоту.

При взаимодействии серной кислоты с водой выделяется большое количество тепла. Например, при растворении одного моля H_2SO_4 в 50 молях воды выделяется 17 100 калорий. Поэтому надо быть очень осторожным, особенно если кислота разводится в стеклянной посуде, которая от нагрева может легко растрескаться.

При приготовлении электролита ни в коем случае нельзя вливать воду в кислоту, так как при этом вода сильно нагревается, вскипает и разбрызгивается вместе с частицами кислоты. Брызги могут причинить тяжелые ожоги. При попадании кислоты на кожу необходимо сейчас же смыть ее холодной водой. При попадании капель кислоты на одежду необходимо смочить раствором соды или нашатырным спиртом место, на которое попала кислота, и затем промыть его водой.

В зависимости от назначения и условий работы аккумуляторные батареи должны иметь электролит определенной плотности. В аккумуляторах авиационного типа обычно применяются растворы серной кислоты следующих плотностей:

1. Для заливки батарей, вводимых в эксплуатацию или после консервации, $d=1,25\text{ г/см}^3$.

2. Для доведения плотности электролита до нормальной, когда аккумулятор имеет электролит пониженной плотности, $d=1,40\text{ г/см}^3$.

3. Для заливки с целью уничтожения сульфатации $d=1,060\text{ г/см}^3$.

При эксплуатации аккумуляторов надлежащую плотность электролита устанавливают в конце заряда.

Нормальной плотностью электролита для большинства аккумуляторов авиационного типа считается $d=1,285\text{ г/см}^3$ при температуре жидкости 20°C , для аккумуляторов типа 12-САМ $d=1,264\text{ г/см}^3$. Однако в зависимости от времени года и климатических условий, длительности и высоты полета рекомендуется применять электролит с плотностью согласно данным табл. 1.2.

В летнее время при высотных полетах плотность электролита также нужно повышать до $1,3—1,32\text{ г/см}^3$ в зависимости от высоты и продолжительности полета. По возвращении самолета плотность электролита следует приводить к нормальной ($1,285\text{ г/см}^3$).

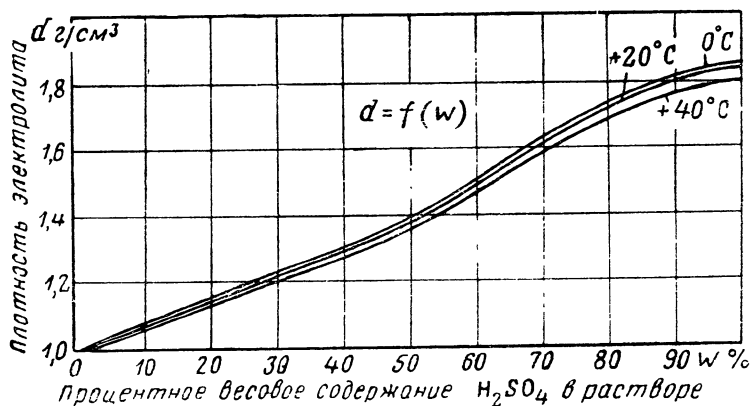
Таблица 1.2

Плотность электролита заряженных аккумуляторов

Температура, при которой предстоит эксплуатировать аккумулятор, в °С	От -40 и ниже	От -25 до -40	От -10 до -25	От +5 до -10	От +25 до +5	От +35 до -25	От +50 до +35
Плотность электролита в конце заряда в г/см ³	1,33	1,32	1,31	1,30	1,285	1,27	1,26

В большинстве случаев как составление электролита необходимой плотности при заливке аккумуляторов, так и доведение плотности электролита до рекомендуемых величин в залитых аккумуляторах требует большой затраты времени, если эти операции производить без предварительных расчетов, чисто опытным подбором компонентов.

С целью ускорения подготовки аккумулятора к работе на самолете, а также для облегчения и ускорения составления электролита рекомен-



Фиг. 1.12. Зависимость плотности электролита от весового содержания H_2SO_4 в растворе.

дуется заранее произвести расчет необходимого количества отдельных частей растворов серной кислоты, из которых должна готовиться смесь для электролита.

Для точного расчета объемов смешиваемых растворов серной кислоты при составлении раствора электролита требуемой плотности необходимо знать для каждого раствора плотность d при температуре ϑ и процентное весовое содержание чистой серной кислоты H_2SO_4 в растворе W . Эти данные приведены в виде диаграммы на фиг. 1.12.

В практике измерение количества раствора электролита производится по объему (в литрах или миллилитрах).

Для случая, когда необходимо иметь определенный объем электролита V_c с заданной плотностью d , поступают следующим образом:

1. Посредством ареометра измеряют плотности d_1 и d_2 компонентов, т. е. растворов серной кислоты, из которых должна быть приготовлена смесь плотностью d , а также температуры этих жидкостей. Естественно, плотность раствора электролита d должна быть меньше d_2 и больше d_1 .

2. По полученным в результате измерения данным в отношении d_2 и d_1 , при ϑ_2 и ϑ_1 и для требуемой плотности d при ϑ из диаграммы

(фиг. 1.12) находят соответствующие значения процентного содержания чистой кислоты H_2SO_4 , т. е. величины $W_2 \cdot W_1$ и $\bar{W}$.

3. Объемы смешиваемых растворов кислоты V_2 и V_1 для получения смеси объемом V вычисляются по формулам:

$$V_2 = V \frac{d}{d_2} \frac{W - W_1}{W_2 - W_1}, \quad (1.6)$$

$$V_1 = V \frac{d}{d_1} \frac{W_2 - W}{W_2 - W_1}. \quad (1.7)$$

Отношение объемов смешиваемых растворов

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{W - W_1}{d_2} : \frac{W_2 - W}{d_1}. \quad (1.8)$$

Эти формулы базируются на том, что при смешении сохраняются общее весовое количество смесей и вес чистой кислоты в растворе, которые выражаются аналитически так:

$$V_1 d_1 + V_2 d_2 = V d, \quad (1.9)$$

$$V_1 d_1 W_1 + V_2 d_2 W_2 = V d W. \quad (1.10)$$

Иногда концентрация растворов электролитов выражается в градусах Боме (Be).

Для перевода плотности в градусы Боме и обратно можно, не прибегая к таблицам, пользоваться следующими формулами, дающими достаточно точные результаты:

$$Be = 145 - \frac{145}{d}, \quad d = \frac{145}{145 - Be}, \quad (1.11)$$

где d — плотность раствора в $г/см^3$.

§ 1.5. ХАРАКТЕРИСТИКИ СВИНЦОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

Электродвижущая сила. Э. д. с. аккумулятора E_A зависит от плотности и температуры электролита.

Величина э. д. с. при плотности электролита $1,285 г/см^3$ и температуре $15^\circ C$ равна $2,125 в$.

С увеличением плотности электролита э. д. с. возрастает (фиг. 1.13).

Зависимость э. д. с. от плотности серной кислоты при изменении ее в пределах от $1,05$ до $1,3 г/см^3$ может быть с достаточным приближением выражена уравнением

$$E_A = 0,84 + d \text{ вольт}, \quad (1.12)$$

где d — плотность электролита при $15^\circ C$ в $г/см^3$.

При нахождении э. д. с. для нормальных плотностей электролита можно пользоваться также и другой эмпирической формулой

$$E_A = 1,85 + 0,00057 \bar{W} \text{ вольт}, \quad (1.13)$$

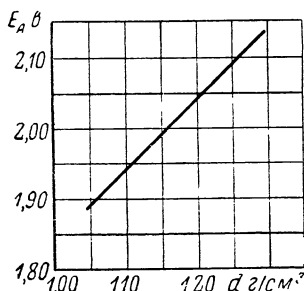
где $\bar{W}$ — весовое содержание безводной серной кислоты в граммах в $1 л$ раствора ($\bar{W} = W \cdot d$).

При заряде и разряде аккумулятора плотность электролита в порах пластин отличается от плотности электролита в сосуда аккумулятора. Поэтому формулы (1.12), (1.13) для определения э. д. с. справедливы только в том случае, когда плотность электролита измеряется через несколько часов после выключения аккумулятора, т. е. когда благодаря

диффузии плотность электролита в порах пластин и сосуда аккумулятора уже выравнилась.

Температурный коэффициент э. д. с. свинцового аккумулятора весьма мал. Максимальное значение его не превышает $0,4 \text{ мВ}/^\circ\text{С}$. Практически можно считать, что э. д. с. почти не зависит от температуры электролита. Э. д. с. аккумулятора не зависит от размера и количества пластин. При разряде аккумулятора э. д. с. падает, и когда она доходит до $1,85\text{—}1,8 \text{ в}$, аккумулятор считается разряженным.

Однако по э. д. с. нельзя точно судить о степени разряженности аккумулятора, так как э. д. с. разряженного аккумулятора с большой плотностью электролита может быть выше, чем э. д. с. заряженного аккумулятора, имеющего меньшую плотность электролита.



Фиг. 1.13. Зависимость э. д. с. элемента свинцового аккумулятора от плотности электролита.

Внутреннее сопротивление. Внутреннее сопротивление аккумулятора представляет собой совокупность сопротивления электролита, электродов и сопротивления, возникающего в местах соприкосновения электродов с электролитом, т. е. в капиллярах активной массы (так называемого переходного сопротивления), и сопротивления сепараторов. Большую часть всего этого сопротивления составляет сопротивление раствора электролита как в самом аккумуляторе, так и внутри пор активной массы.

Сопротивление электролита зависит от его плотности и температуры (см. фиг. 1.10).

Удельное сопротивление веществ, из которых выполнены другие части аккумулятора, по сравнению с удельным сопротивлением электролита невелико. Например, для губчатого свинца оно равно около $0,00018 \text{ ом} \cdot \text{см}$, а для перекиси свинца — $0,25 \text{ ом} \cdot \text{см}$.

В процессе разряда и заряда удельное сопротивление электролита и активной массы электродов изменяется, вследствие чего изменяется и полное внутреннее сопротивление аккумулятора. Сопротивление аккумулятора уменьшается во время заряда и увеличивается при разряде. Это происходит потому, что во время разряда аккумулятора сопротивление пластин в связи с образованием на них сульфата свинца, плохо проводящего ток, возрастает, также возрастает и сопротивление электролита из-за понижения его плотности. В результате внутреннее сопротивление аккумулятора заметно увеличивается.

При разряде большими токами, когда плотность электролита в порах и вблизи пластин вследствие малой скорости диффузии уменьшается сильнее, внутреннее сопротивление аккумулятора резко увеличивается. При прекращении разряда сопротивление аккумулятора начинает постепенно уменьшаться вследствие выравнивания концентрации электролита в порах пластин и уменьшения переходного сопротивления электролита.

При заряде аккумулятора плотность электролита и проводимость пластин возрастают и, следовательно, внутреннее сопротивление его падает. Однако в конце заряда, когда наступает интенсивное газовыделение, сопротивление аккумулятора начинает возрастать, так как пузырьки газа заполняют часть пор сепараторов и активного вещества и тем самым уменьшают проводимость. После выключения аккумулятора пузырьки газа поднимаются на поверхность и внутреннее сопротивление уменьшается.

Внутреннее сопротивление свинцовых авиационных аккумуляторов весьма мало и составляет сотые или даже тысячные доли ома. Это ценное свойство позволяет получать от аккумуляторов большие токи при сравнительно малых потерях внутри аккумулятора.

На внутреннее сопротивление аккумулятора оказывают влияние размеры площади поверхности пластин, число параллельно включенных пластин в одном элементе и расстояние между пластинами. Чем больше число пластин, включенных параллельно, и чем меньше расстояние между ними, тем меньше при прочих равных условиях внутреннее сопротивление аккумулятора.

Напряжение. Напряжение аккумулятора отличается от э. д. с. E_A на величину падения напряжения во внутренней цепи аккумулятора.

При заряде аккумулятора

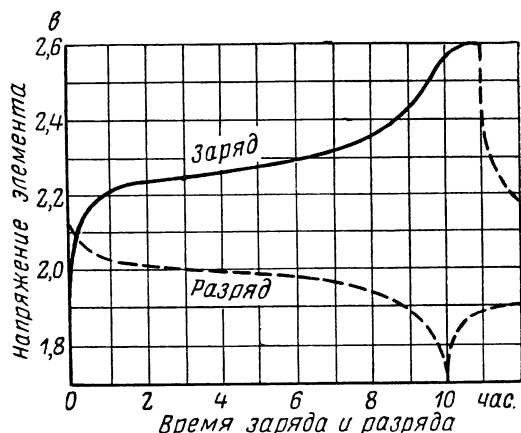
$$U_z = E_A + IR_A, \quad (1.14)$$

а при разряде

$$U_p = E_A - IR_A, \quad (1.15)$$

где I — ток, протекающий через аккумулятор при заряде или разряде;

R_A — внутреннее сопротивление аккумулятора.



Фиг. 1.14. Изменения напряжения элемента свинцового аккумулятора при заряде и разряде.

На фиг. 1.14 показаны типичные кривые изменения по времени напряжения одного элемента аккумулятора 12-А-30 при заряде и разряде его током 10-часового режима, который для большинства авиационных аккумуляторов принимается за номинальное значение разрядного тока.

При включении аккумулятора на заряд в первый момент наблюдается резкое увеличение напряжения на зажимах аккумулятора из-за необходимости компенсации падения напряжения на его внутреннем сопротивлении. Кроме того, это повышение объясняется тем, что в результате химической реакции вблизи пластин образуется серная кислота, плотность электролита повышается, увеличивается э. д. с., а следовательно, и напряжение. Дальнейшее повышение кривой напряжения при заряде связано с ростом плотности электролита, а следовательно, и э. д. с.

После прекращения заряда аккумулятора э. д. с. сначала быстро, а затем медленно понижается вследствие выравнивания плотности электролита. В авиационных полностью заряженных аккумуляторах при плотности электролита $1,285 \text{ г/см}^3$ э. д. с. понижается до $2,13$ — $2,17 \text{ в}$ на элемент или $25,5$ — $26,0 \text{ в}$ на батарею из 12 элементов.

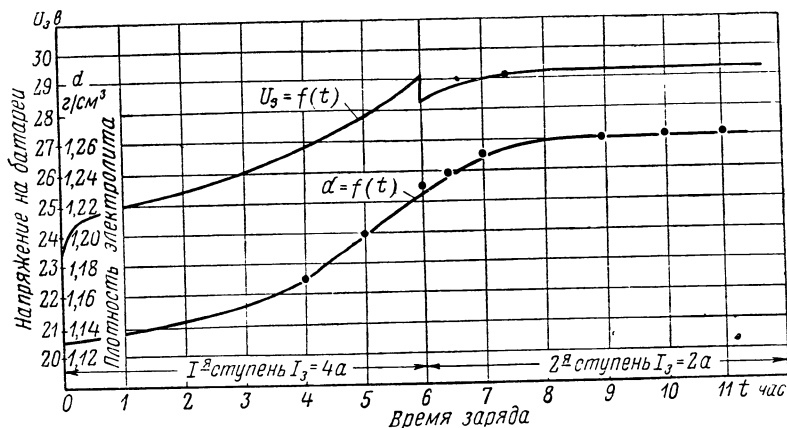
На фиг. 1.15 представлены кривые изменения напряжения на аккумуляторе 12-САМ-28 и кривая изменения плотности электролита при заряде. Заряд производился в две ступени токами 4 а и 2 а .

При разряде аккумулятора в результате химических реакций плотность электролита уменьшается в порах активной массы пластин и около пластин.

Практически разряд аккумулятора можно вести только до определенного конечного напряжения, разряд ниже которого приводит к порче аккумулятора.

При разряде номинальным током конечное допустимое напряжение разряда авиационных аккумуляторов составляет 1,7 в.

По прекращении разряда э. д. с. аккумулятора несколько увеличивается вследствие выравнивания плотности электролита. Происходит так называемое восстановление э. д. с.

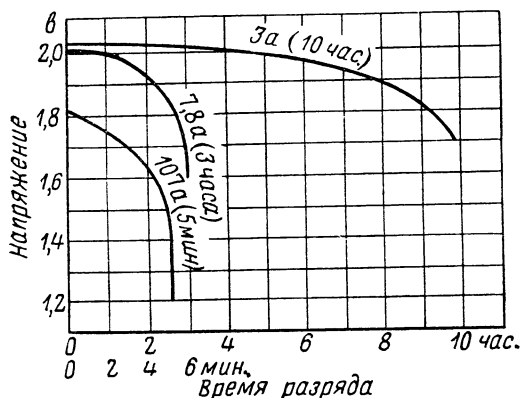


Фиг. 1.15. Изменения напряжения на зажимах и плотности электролита аккумулятора 12-САМ-28 при двухступенчатом заряде.

Если аккумулятор разряжается током больше номинального, то все реакции протекают соответственно быстрее. Кривая зависимости разрядного напряжения для разрядного тока, большего номинального, сохраняя те же характерные участки, что и при разряде номинальным током, идет ниже и с большим наклоном к оси абсцисс (фиг. 1.16). Правилами эксплуатации для больших разрядных токов допускаются меньшие конечные напряжения. Чем больше разрядный ток, тем ниже конечное

напряжение. В табл. 1.3 указаны конечные напряжения аккумуляторов типа 12-А-30 и 12-САМ для различных режимов разряда.

При заряде аккумуляторов ход кривых напряжения также зависит от величины зарядного тока. Чем меньше величина зарядного тока, тем ниже и менее круто идут кривые напряжения, так как при меньшем зарядном токе в единицу времени меньше выделяется серной кислоты и плотность электролита выравнивается быстрее. При возрастании зарядного тока крутизна кривых напряжения увеличивается и сами кривые



Фиг. 1.16. Кривые изменения напряжения элемента свинцового аккумулятора при разрядах различными токами.

располагаются выше. Повышение напряжения при заряде вызывает увеличение потерь, а следовательно, и увеличение температуры электролита аккумулятора, которой и ограничивается величина зарядного тока.

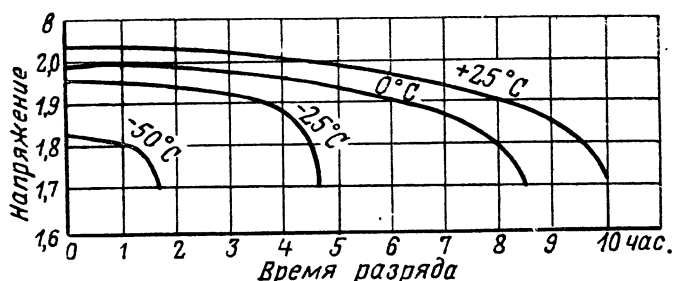
Температура электролита оказывает существенное влияние на напряжение во время разряда и заряда аккумуляторов.

Таблица 1.3

Конечные напряжения самолетных аккумуляторов типа 12-А-30 и 12-САМ

Режим разряда в часах	10	5	3	1	30 мин.	5 мин.	2 мин.
Конечное напряжение в в	1,70	1,65	1,60	1,54	1,50	1,20	1,10

При понижении температуры вязкость электролита возрастает и, следовательно, выравнивание плотности электролита замедляется; внутреннее сопротивление аккумулятора также возрастает, вызывая увеличение падения напряжения при прохождении тока. В результате этого напряжение на зажимах аккумулятора для одного и того же разрядного тока при пониженной температуре получается несколько ниже и падает быстрее, чем при более высокой температуре (фиг. 1.17).



Фиг. 1.17. Кривые изменения напряжения элемента свинцового аккумулятора при разрядах при различных температурах.

При замерзании электролита э. д. с. аккумулятора практически равна нулю.

Заряд аккумулятора при пониженной температуре требует повышения зарядного напряжения.

Емкость. Емкостью аккумулятора называется количество электричества, которое аккумулятор отдает при разряде до наименьшего допустимого напряжения.

В общем случае емкость

$$Q_p = \int_0^t i_p dt. \quad (1.16)$$

Если разряд происходит при постоянной силе тока

$$i_p = I_p = \text{const},$$

то

$$Q_p = I_p t_p, \quad (1.17)$$

где t_p — время разряда.

Емкость аккумулятора обычно выражается в ампер-часах.

За номинальную емкость авиационных аккумуляторов принимают емкость при 10-часовом разряде до напряжения на зажимах элемента 1,7 в (при этом начальная плотность электролита при температуре $\vartheta = +20^\circ \text{C}$ должна быть $1,285 \text{ г/см}^3$).

Емкость зависит от ряда факторов: количества активного вещества, его пористости, толщины и площади пластин, величины разрядного тока,

температуры и плотности электролита, атмосферного давления и предшествующего состояния аккумулятора.

Емкость аккумуляторов определяется количеством активных масс, вступающих во взаимодействие при разряде аккумуляторов до конечного напряжения.

При одинаковом количестве активных масс аккумулятор с тонкими пластинами имеет большую емкость, чем с толстыми, так как при тонких пластинах кислота легче проникает в поры активных масс, а также непосредственно омывает большее количество активной массы, что обеспечивает лучшее ее использование. По той же причине чем пористее масса, тем большую емкость можно от нее получить.

Таким образом, аккумулятор с тонкими пластинами обладает меньшим весом и объемом, чем аккумулятор с толстыми пластинами той же емкости. Кроме того, аккумулятор с тонкими пластинами имеет значительно меньшее внутреннее сопротивление и, следовательно, обладает лучшими разрядными свойствами. Поэтому в авиационных аккумуляторах используются пластины толщиной 2,0—3,0 мм. Толщина их ограничивается лишь соображениями механической прочности.

Недостатком тонких пластин являются сравнительно короткий срок службы и трудность удержания активной массы на самих пластинах.

Повышение плотности электролита увеличивает емкость аккумулятора. Однако это увеличение допустимо до известного предела, выше которого начинают сказываться вредные влияния: повышенный саморазряд, разрушение пластин и т. п.

Особенно сильное влияние на емкость аккумуляторов оказывает режим разряда. Чем больше величина разрядного тока, тем меньше емкость аккумулятора. Как видно из фиг. 1. 18, на которой приведена кривая разрядной характеристики, аккумуляторы при разряде током больше номинального отдадут емкость меньше номинальной.

Уменьшение емкости аккумулятора при увеличении разрядного тока объясняется отставанием процесса диффузии от процесса разряда, образованием сульфата на поверхности пластин и увеличением внутреннего сопротивления аккумулятора.

Для практических целей важно знать зависимость между разрядной емкостью и величиной разрядного тока.

Наибольшее распространение получила эмпирическая формула Пейкертта, устанавливающая зависимость между продолжительностью разряда и током разряда аккумулятора

$$I_p^n t = c, \quad (1.18)$$

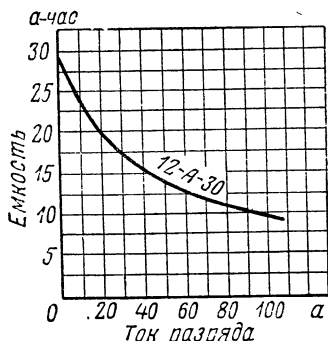
где I_p — ток разряда;

t — время разряда;

c и n — постоянные, определяемые опытным путем.

Для аккумулятора 12-А-30 $n=1,26$, $c=35,8$. Так как

$$I_{p1}^n t_1 = I_{p2}^n t_2, \quad (1.19)$$



Фиг. 1. 18. Зависимость емкости аккумулятора 12-А-30 от разрядного тока.

то

$$n = \frac{\lg \frac{t_2}{t_1}}{\lg \frac{I_{p1}}{I_{p2}}}. \quad (1.20)$$

Формула Пейкerta позволяет вычислить разрядную емкость для определенного режима по показателю n и номинальным данным:

$$Q_p = Q_{\text{ном}} \left(\frac{I_{\text{ном}}}{I_p} \right)^{n-1}, \quad (1.21)$$

где $Q_{\text{ном}}$ — номинальная емкость;
 $I_{\text{ном}}$ — номинальный разрядный ток.

Следует отметить, что формула Пейкerta справедлива только для токов разряда, незначительно отличающихся от номинального. Для определения емкости аккумулятора при токах разряда, значительно превышающих номинальный, необходимо учитывать зависимость показателя n от тока разряда. Так, например, для аккумулятора 12-А-30 при токе от 3 до 50 а $n=1,26$, при токе от 60 до 150 а $n=1,30$, при токе от 200 до 400 а $n=1,35$.

С достаточным приближением емкость Q_p при разряде токами, большими номинальных, можно вычислить по формуле, предложенной и проверенной по экспериментальным данным Б. А. Ставорским:

$$Q_p = 0,4 Q_{\text{ном}} \lg \frac{I_{a \text{ max}}}{I_p}, \quad (1.22)$$

где $I_{a \text{ max}}$ — ток короткого замыкания аккумулятора;
 I_p — разрядный ток аккумулятора, при котором определяется емкость Q_p .

Очень сильное влияние на величину емкости аккумулятора оказывает также температура электролита. С понижением температуры электролита емкость уменьшается вследствие увеличения вязкости электролита, вызывающего в свою очередь ухудшение диффузии, возрастание сопротивления электролита и уменьшение напряжения (фиг. 1.19).

Изменение емкости аккумуляторов в зависимости от температуры характеризуется температурным коэффициентом емкости, т. е. относительной величиной изменения емкости аккумулятора при изменении температуры его электролита на 1°C .

Если известна емкость аккумулятора при температуре $\vartheta=20^\circ$, то емкость для другой температуры ϑ вычисляется по формуле

$$Q_p = Q_{20} [1 + \alpha_\vartheta (\vartheta - 20)], \quad (1.23)$$

где Q_{20} — емкость аккумулятора при температуре электролита $+20^\circ \text{C}$;
 α_ϑ — температурный коэффициент емкости;
 ϑ — температура электролита аккумулятора, для которой определяется емкость.

Величина температурного коэффициента емкости зависит от температуры электролита и режима разряда. Для аккумуляторов типа 12-А значения α_ϑ приведены в табл. 1.4.

В случае изменения разрядных токов и температуры электролита в широких пределах определять емкость рекомендуется по специальным номограммам.

Таблица 1.4

**Температурный коэффициент емкости аккумулятора 12-А-30
по отношению к емкости при 20°С**

Режим разряда	Ток разряда в а	Температурный коэффициент в процентах в интервале температур		
		от +20 до 0°С	от 0 до -25°С	от -25 до -50°С
10-часовой	3,0	0,65	0,95	1,20
3-часовой	7,8	1,05	1,25	1,27
5-минутный	107,0	1,54	2,06	—

При изменении атмосферного давления от нормального до 35 мм рт. ст. при температуре электролита +20°С (по данным Н. Т. Коробана) емкость аккумулятора 12-А-30 увеличивается примерно на 4%.

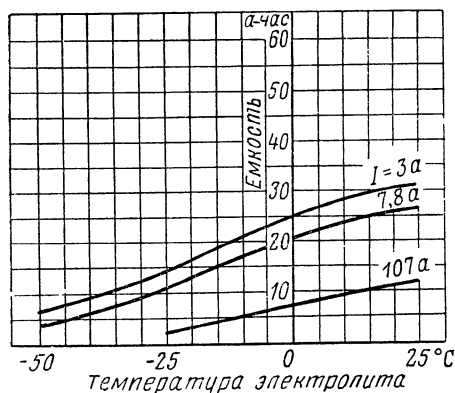
Остаточная емкость разряда. Одной из характерных особенностей свинцового аккумулятора является способность дальнейшей отдачи электрической энергии при переходе от одного разрядного режима к другому.

Известно, что аккумулятор, полностью разряженный при каком-либо режиме, например 3-часовом, может при разряде его меньшим током, например, током 10-часового режима, отдать еще некоторую емкость (дополнительную), так называемую остаточную емкость.

Подобное же явление имеет место при разряде аккумуляторов при различных температурах.

Так, например, от батареи, которая отдает при -45°С всего 22,5% номинальной емкости, оказывается возможным при повышении температуры до 20°С получить еще 55% номинальной емкости.

Фиг. 1.19. Зависимость емкости свинцового аккумулятора от разрядного тока и температуры.



Коэффициент отдачи и к.п.д. аккумулятора. При эксплуатации аккумуляторов необходимо знать коэффициент использования электрической энергии или количество электричества, затрачиваемого на заряд аккумуляторов. Коэффициент этот обычно называют коэффициентом отдачи или просто отдачей. Различают:

а) отдачу по емкости

$$\eta_Q = \frac{\int_0^{t_p} i_p dt}{\int_0^{t_z} i_z dt}, \quad (1.24)$$

где t_p — время разряда, а t_z — заряда;

б) отдачу по энергии, или коэффициент полезного действия аккумулятора

$$\eta_A = \frac{\int_0^{t_p} U_p i_p dt}{\int_0^{t_3} U_3 i_3 dt}, \quad (1.25)$$

где U_p , U_3 , i_p , i_3 — напряжения и токи разряда и заряда.

Отдача свинцового аккумулятора по емкости при нормальных режимах заряда и разряда находится в пределах 80—90 %. При разрядах большим током отдача становится меньше.

Коэффициент отдачи по энергии, или к. п. д. свинцового аккумулятора при нормальных режимах заряда и разряда, находится в пределах 65—75 %.

С а м о р а з р я д. Саморазрядом называется безвозвратная потеря емкости химическим источником тока как при разомкнутой, так и при замкнутой внешней цепи вследствие самопроизвольно протекающих внутри него электрохимических процессов.

Различают два вида саморазряда: нормальный и увеличенный (ускоренный). Нормальный саморазряд появляется в результате взаимодействия активных масс электрода и электролита и в данных условиях является процессом, зависящим только от природных свойств активных элементов.

Ускоренный саморазряд происходит из-за присутствия примесей в электролите и в активных массах электродов, а также вследствие коротких замыканий во внутренней или внешней цепи аккумулятора.

Нормальный саморазряд вызывается, главным образом, электрохимическими процессами, происходящими на отрицательных пластинах.

Саморазряд в эксплуатационных условиях характеризуется потерей емкости за сутки:

$$\rho_Q = \frac{Q_{\text{ном}} - Q_{\text{хр}}}{t_{\text{хр}}} 100\%, \quad (1.26)$$

где $Q_{\text{ном}}$ — номинальная емкость, гарантированная заводом-изготовителем;

$Q_{\text{хр}}$ — емкость аккумулятора после хранения;

$t_{\text{хр}}$ — время хранения в сутках.

Саморазряд отрицательных пластин составляет 0,5—1,0 %. Саморазряд положительных пластин даже при повышенных температурах составляет лишь 0,2—0,25 % в сутки.

Так как даже исправный полностью заряженный, но неработающий аккумулятор непрерывно разряжается вследствие саморазряда, то необходимо время от времени подзаряжать аккумулятор, в противном случае он полностью разрядится и выйдет из строя.

С р о к с л у ж б ы. Срок службы аккумулятора определяется числом циклов нормальных зарядов—разрядов. Циклом называется однократный процесс заряда — разряда аккумулятора.

Срок службы стационарных кислотных аккумуляторов определяется в тысячу и более циклов, а авиационных — не превышает 150—200 циклов.

Срок службы в значительной мере зависит от правильности эксплуатации. Например, систематические недозаряды кислотного аккумулятора значительно уменьшают срок его службы.

Обязательным условием эксплуатации аккумуляторов должно быть строгое соблюдение правил эксплуатации согласно специальным инструкциям.

Отступление от этих правил часто бывает причиной неисправностей аккумуляторов и сокращения срока их службы.

Стартерные свойства аккумуляторов. Под стартерными свойствами аккумуляторов подразумевается способность аккумулятора разряжаться кратковременными большими токами, значительно превосходящими по величине их номинальное значение.

Так как авиационный аккумулятор обеспечивает питание электроэнергией лишь в моменты появления пиковых нагрузок, т. е. когда на самолете включают стартеры, агрегаты дистанционного управления, электрифицированные установки вооружений и т. д., которые потребляют большие кратковременные токи, то он должен обладать хорошими стартерными свойствами. Особенно хорошими стартерными свойствами должны обладать аккумуляторы, предназначенные для запуска поршневых и реактивных двигателей, так как пики тока при запуске могут достигать 1300—1500 а.

Особенностью работы самолетных аккумуляторов в полете является разряд большими токами в условиях резко изменяющейся температуры, ибо, несмотря на наличие контејнеров, электролит все же может охлаждаться до температуры $0 \div -5^\circ \text{C}$.

Стартерные свойства свинцового аккумулятора определяются внутренним сопротивлением, которое должно быть очень мало и не превышать сотых долей ома.

При определении стартерных свойств аккумулятора главную роль играет сопротивление электролита и пластин.

Как было указано выше, сопротивление аккумулятора резко увеличивается при разряде большими токами вследствие уменьшения плотности электролита, особенно в порах активной массы пластин. Переход активной массы положительной и отрицательной пластин в серноокислый свинец увеличивает сопротивление электродов. Кроме того, при разряде большими токами в электролите происходит процесс газообразования. Это приводит к значительному увеличению сопротивления аккумулятора и резко снижает его стартерные свойства за счет увеличения электрических потерь внутри аккумулятора.

При стартерном разряде химические реакции проходят весьма интенсивно, наблюдается бурный процесс распада молекул серной кислоты. Процесс сульфатации происходит быстрее и в первую очередь по поверхности пластин.

Емкость аккумулятора при стартерном разряде зависит от толщины и пористости пластин. Более резкое уменьшение емкости наблюдается у аккумулятора с толстыми пластинами, так как в этом случае используются только поверхностные слои активной массы, и электролит не успевает проникнуть в поры толстых пластин.

При тонких пластинах активная масса используется лучше.

Существенное влияние на стартерные свойства оказывает состояние аккумулятора. Стартерные свойства резко ухудшаются при увеличении степени разряженности аккумулятора.

Практически стартерные качества аккумуляторов оцениваются числом запусков стартера, которое можно осуществить от данного типа батареи, предварительно полностью заряженной.

Высотность аккумулятора. Электрические характеристики аккумулятора зависят от высоты полета самолета и продолжительности

полета на данной высоте, так как этими факторами определяются температурные условия работы аккумулятора, а следовательно, и его емкость.

Емкость аккумулятора при понижении давления при температурах электролита выше -5°C увеличивается; при температурах электролита ниже -5°C — уменьшается (фиг. 1. 20).

При понижении атмосферного давления процесс заряда аккумулятора протекает несколько иначе, чем при нормальных условиях. Так, например, при атмосферном давлении 200 мм рт. ст., соответствующем высоте полета 10 000—11 000 м, напряжение на элементах в момент заряда на 10—12% ниже, чем при заряде тем же током на земле.

Наступление момента обильного газовыделения при пониженных давлениях происходит несколько раньше, чем при нормальном давлении.

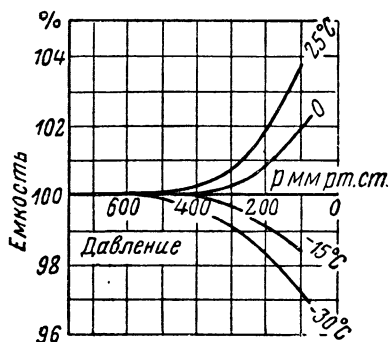
Понижение температуры электролита, как уже было сказано, вызывает уменьшение емкости аккумуляторных батарей.

Ранее было указано, что атмосферное давление незначительно влияет на емкость аккумулятора. Но следует отметить, что при работе аккумуляторных батарей в сильно разреженной атмосфере (на высоте свыше 20 км) происходит своеобразное «исчезновение» электролита из бака аккумулятора. На самом деле происходит не «исчезновение» электролита, а всасывание его в поры пластин. При возвращении аккумулятора в атмосферу с нормальным давлением электролит выходит из пор и заполняет бак элемента до прежнего уровня.

Естественно, при «исчезновении» электролита между пластинами внутреннее сопротивление аккумулятора становится чрезмерно большим, так как токопроводящая среда между положительными и отрицательными электродами в этом случае почти отсутствует.

При разработке аккумуляторов, предназначенных для работы на больших высотах, необходимо, чтобы количество электролита в баке было значительно больше количества электролита, которое могут вместить поры пластин. При этом уровне электролита при работе аккумулятора в нормальной и сильно разреженной атмосфере остаются практически одинаковыми.

При охлаждении электролита ниже -30°C как при разряде, так и при заряде уровень электролита в элементах повышается. У заряженной батареи при температуре электролита -50° — -60°C уровень электролита на 8—12 мм выше уровня при температуре $+20^{\circ}\text{C}$.



Фиг. 1. 20. Зависимость емкости аккумулятора от атмосферного давления и температуры.

Основные технические данные свинцовых аккумуляторов

Аккумуляторы типа 12-А и 12-САМ выпускаются в одном из следующих состояний: полузаряженные, не подвергавшиеся электрическим испытаниям на заводе; полузаряженные, подвергавшиеся электрическим испытаниям; сухозаряженные.

Аккумуляторы типа САМ отличаются от аккумуляторов типа 12-А лучшими стартерными свойствами. Небольшая величина внутреннего сопротивления аккумуляторов типа САМ (0,02 ом у аккумулятора 12-САМ-28 и 0,01 ом у аккумулятора типа 12-САМ-53) достигнута за счет увеличения числа пластин и сечения межконтактных соединений.

Так, если число отрицательных пластин у аккумулятора 12-А-30 равно 4, а положительных 3, то у аккумулятора 12-САМ-28 отрицательных пластин 6, а положительных 5, а у аккумулятора 12-САМ-53 отрицательных 11, а положительных 10. Плотность электролита у аккумуляторов типа САМ берется несколько меньшей, чем у аккумуляторов типа 12-А (при 20° С 1,26 г/см³ вместо 1,285 г/см³ у аккумуляторов типа 12-А).

Основные технические данные некоторых авиационных аккумуляторов приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Технические данные некоторых авиационных аккумуляторов

		Типы аккумуляторов	12-А-30	12-АО-50	12-САМ-28	12-САМ-53
Режим разряда ¹	10 час.	Ток в <i>a</i>	3	4,8	—	—
		Емкость в <i>a-ч</i>	27	45	—	—
		Конечное напряжение элемента в <i>b</i>	1,7	1,7	—	—
	5 час.	Ток в <i>a</i>	4,8	9	5,6	11
		Емкость в <i>a-ч</i>	21,6	45	28	53
		Конечное напряжение элемента в <i>b</i>	1,7	1,7	1,7	1,7
	5 мин.	Ток в <i>a</i>	107	225	100	300
		Емкость в <i>a-ч</i>	8,9	18	—	—
		Конечное напряжение элемента в <i>b</i>	1,2	1,2	1,1	1,1
	2 мин.	Ток в <i>a</i>	210	360	—	—
		Емкость в <i>a-ч</i>	7	—	—	—
		Конечное напряжение элемента в <i>b</i>	1,1	—	—	—
Габариты	Длина верхней части в <i>мм</i>		369	378	369	369×2
	Ширина в <i>мм</i>		163	328	163	163
	Высота с крышкой в <i>мм</i>		214	245	214	214
	Вес с электролитом в <i>кг</i>		27,5	52,5	28,5	55
Срок службы при емкости	100% (циклов)		40	—	40	40
	75% (циклов)		25	—	—	—
	Всего (циклов)		65	—	—	—
Отдача при длительном режиме	По емкости в %		≥80	—	≥80	≥80
	По энергии в %		≥65	—	≥65	≥65
Максимальный ток разряда в <i>a</i>			210	360	650	1300

¹ Характеристики разряда относятся к температуре +20° С и нормальной плотности электролита в заряженном состоянии аккумулятора.

§ 1.6. УСТАНОВКА АККУМУЛЯТОРОВ НА САМОЛЕТАХ. ПРИСОЕДИНЕНИЕ АЭРОДРОМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ К БОРТОВОЙ СЕТИ САМОЛЕТА

Аккумуляторы на самолете, как правило, устанавливают в специальных контейнерах, которые уменьшают теплоотдачу от аккумулятора и одновременно предохраняют его от механических повреждений и проникновения в него масла, воды и других веществ.

Аккумулятор размещают на самолете в легко доступном месте так, чтобы его было удобно снимать и вновь устанавливать.

С целью уменьшения вибраций аккумулятора контейнер устанавливают на листовую резину либо войлок. Иногда аккумулятор подвешивают на специальных амортизаторах. В некоторых случаях аккумулятор устанавливают и снимают с самолета вместе с контейнером, иногда контейнер является неотъемлемой частью самолета. В первом случае при заряде на зарядной станции прогревается и контейнер аккумулятора, в результате чего при установке на самолете электролит охлаждается медленнее, чем при установке аккумулятора в охлажденный контейнер.

Для присоединения аккумуляторов к бортовой электросети самолета на контейнерах устанавливают штепсельные розетки. Аккумуляторы подключают к розетке при помощи проводников с наконечниками или специальными штыревыми контактами.

В бортовой электросети самолета имеется жгут со штепсельной вилкой для включения его в штепсельную розетку аккумулятора.

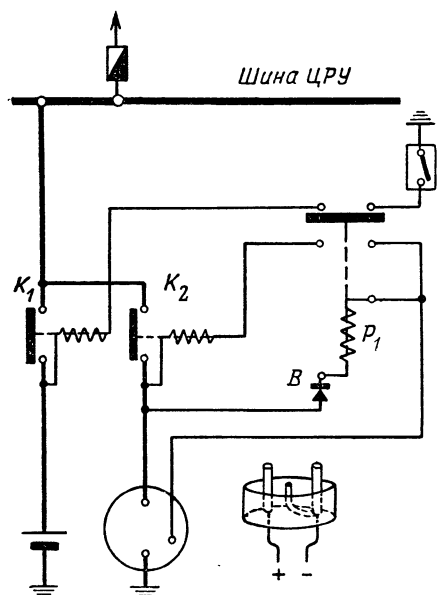
Контейнеры для установки аккумуляторов на самолетах выполняются в большинстве случаев из дуралюмина с теплоизолирующей кислотоупорной прокладкой из оленьего войлока или твердого анозола. Контейнер снабжается также протектором, затягивающим пулевые пробоины.

Чрезмерное увеличение толщины теплоизоляции ведет к увеличению веса системы аккумулятор—контейнер. Оптимальная толщина теплоизоляционного слоя различна для различных условий работы аккумулятора (температурных условий и продолжительности полета). Обычно толщина теплоизоляционного слоя в контейнерах не превышает 15—20 мм. В тех случаях, когда не требуется экранировки аккумулятора, контейнеры изготовляют из дерева, но также с теплоизоляционными прокладками. Теплоизоляционные качества деревянных контейнеров лучше, чем металлических. Для выхода газов контейнеры снабжаются вентиляционными отверстиями.

Эксплуатацию аккумуляторов нужно вести при температурах электролита не ниже -5°C , так как при более низкой температуре значительно уменьшается емкость и подзаряд аккумулятора при нормальном напряжении сети становится невозможным. При продолжительных полетах при минусовых температурах теплоизоляция аккумулятора не приносит уже желаемого эффекта и приходится применять обогрев аккумулятора, чтобы поддерживать требуемую температуру электролита.

Обогревают аккумуляторы каталитическими или электрическими грелками. Подогрев аккумулятора можно также осуществлять путем пропускания через него переменного тока от вспомогательного генератора переменного тока.

Для присоединения к самолетной электрической сети аэродромного источника электрической энергии на борту самолета имеется специальная розетка аэродромного питания. Во избежание параллельного соединения бортового аккумулятора с аэродромным эта розетка дополняется специальной коммутационной аппаратурой, схема соединения которой изображена на фиг. 1.21. Вилка, соединенная с аэродромным источником,



Фиг. 1.21. Принципиальная схема подключения аэродромных аккумуляторов к бортовой сети самолета.

имеет три штырька: два силовых (плюсовый и минусовый) более длинных и один для управляющих цепей меньшей длины, соединенный с минусом. Когда такая вилка вставляется в розетку, то сначала присоединяются силовые штыри, но подсоединения аккумулятора к сети не происходит. Когда более короткий штырек дойдет до соответствующего гнезда розетки, то сработает управляющее реле P_1 , которое своими контактами разомкнет цепь контактора K_1 , подключающего бортовой аккумулятор к сети, и замкнет цепь контактора K_2 , подключающего аэродромный аккумулятор.

Наличие полупроводникового выпрямителя (вентиль) V в цепи управляющего реле предотвращает присоединение аэродромного источника с неправильной полярностью.

Приключенные аккумуляторы к сети и отключение от нее с помощью контакторов устраняет возможность

обгорания контактов вследствие дугобразования на штырьках вилки и в гнездах самой розетки, а следовательно, и возможность увеличения переходного сопротивления в розетке аэродромного питания.

§ 1.7. ЗАРЯД И РАЗРЯД АККУМУЛЯТОРОВ

Перед зарядкой аккумулятор должен быть залит электролитом соответствующей плотности.

Электролит заливают с помощью стеклянной воронки и стеклянного мерного цилиндра. После заливки аккумулятор должен постоять 6—12 час., чтобы температура электролита, которая после заливки повышается до $+50^\circ\text{C}$, снизилась до $+25^\circ\text{C}$. Перед включением аккумулятора на заряд проверяют уровень электролита с помощью стеклянной трубки, как указано на фиг. 1.22.

Уровень электролита должен быть на 10—15 мм выше верхней кромки пластин, но не выше эбонитового щитка.

Заряд аккумуляторов производится одним из следующих режимов:

а) режимом первого заряда — при введении в эксплуатацию новых аккумуляторных батарей;

б) режимом нормального заряда — при заряде батарей, разряженных в процессе эксплуатации;

в) режимом периодического перезаряда, проводимого в профилактических целях один раз через каждые три месяца эксплуатации батарей или хранения их в заряженном состоянии с электролитом.

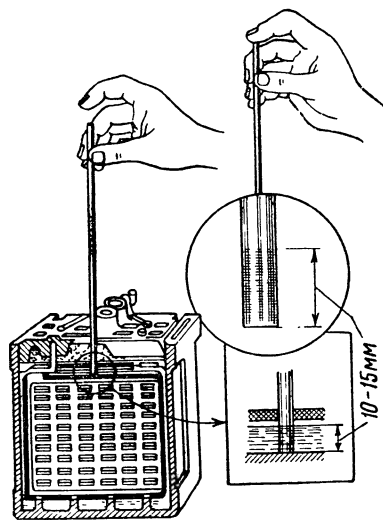
В процессе каждого из этих режимов зарядный ток поддерживают постоянным по величине в течение некоторого промежутка времени до появления интенсивного газообразования (это соответствует напряжению на элементе в 2,35—2,40 в); затем силу тока понижают наполовину и поддерживают постоянной до конца заряда. В первые часы заряда электрохимические процессы в основном протекают на поверхности активной

массы, и поэтому энергия в интервале времени первой ступени заряда почти полностью расходуется на полезные реакции. Повышение напряжения на электродах каждого элемента до 2,35—2,4 в в начале газообразования означает, что внутренние слои активной массы уже вступили в реакцию. При дальнейшем заряде током первой ступени, вследствие того что проникновение реакции внутрь пор пластин идет очень медленно, электрическая энергия главным образом расходуется на нагрев и разложение электролита, что приводит к значительному снижению срока службы пластин аккумуляторов.

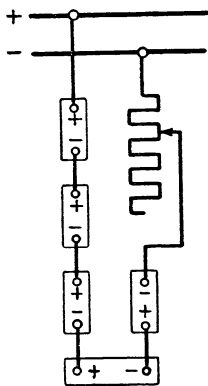
Заряд полностью разряженных батарей только током второй ступени является неэкономичным и связан с затратой большого времени. Электрические соединения при заряде производятся по схемам, изображенным на фиг 1.23—1.25. При этом одноименные зажимы источника и аккумулятора соединяются между собой.

Во время заряда вследствие увеличения э. д. с. аккумулятора по мере заряда необходимо повышать напряжение на зажимах батареи.

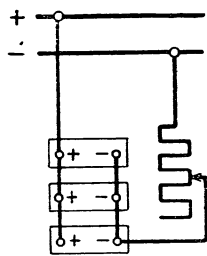
Для регулирования напряжения пользуются реостатом, включаемым последовательно с аккумулятором, или регулировочным устройством, позволяющим изменять напряжение источника тока. Величину зарядного тока контролируют по амперметру через каждые 30 минут.



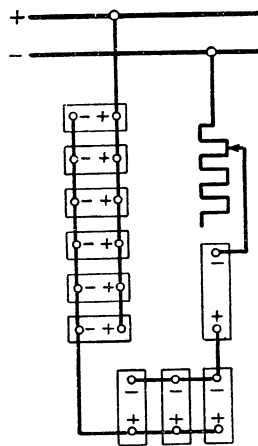
Фиг 1.22. Измерение уровня электролита.



Фиг. 1.23. Последовательное включение аккумуляторов при заряде.



Фиг. 1.24. Параллельное включение аккумуляторов при заряде.



Фиг. 1.25. Смешанное включение аккумуляторов при заряде.

Заряд аккумуляторных батарей можно производить поодиночно или группами. В группу батареи соединяются последовательно или параллельно. При последовательном включении (согласно фиг. 1.23) ток заряда аккумуляторов одинаков, и, следовательно, целесообразно соединять в группу аккумуляторы только одинаковой емкости. При соединении в

группу аккумуляторов различной емкости зарядный ток следует устанавливать по аккумулятору наименьшей емкости.

При параллельном включении аккумуляторов (согласно фиг. 1.24) напряжение на зажимах всех аккумуляторов одинаково, но токи заряда их могут быть различными, вследствие того что э.д.с. и внутреннее сопротивление даже однотипных аккумуляторов всегда несколько отличаются друг от друга. При отключении параллельно соединенной группы от сети происходит разряд батареи, имеющей большую относительно остаточную емкость, на более разряженные аккумуляторы. Поэтому параллельное соединение аккумуляторов при заряде не рекомендуется.

При смешанном включении аккумуляторов (согласно фиг. 1.25), которое часто применяется при заряде аккумуляторов различной емкости, имеют место те же недостатки, что и при параллельном включении.

Первый заряд при вводе аккумуляторов в эксплуатацию производится двумя ступенями тока большой продолжительности. Для аккумуляторов всех типов первая ступень заряда осуществляется током, равным $0,8 I_{\text{ном}}$. Продолжительность заряда этими токами составляет 6—8 час. — до появления бурного газовыделения и достижения напряжения элементов 2,35—2,4 в. После этого следует сделать двухчасовой перерыв для охлаждения батареи и выравнивания плотности электролита в порах и вне пластин.

Вторая ступень заряда производится током $0,5 I_{\text{ном}}$. Заряд этим током следует вести до появления признаков конца заряда. При вводе аккумулятора в эксплуатацию примерная продолжительность второй ступени заряда для всех батарей составляет 24—30 час.

Признаками конца заряда являются:

а) равномерное кипение электролита во всех элементах и обильное газовыделение;

б) постоянство плотности электролита в течение 2 час.;

в) постоянство напряжения в течение 2 час. заряда током второй ступени (при значении напряжения 29,5—30,5 в на аккумулятор типа 12 САМ 28 или 2,45—2,65 в на один элемент его).

В процессе заряда необходимо регулярно измерять напряжение аккумулятора и плотность электролита.

Измерения напряжения следует производить через 10 мин. после начала заряда и затем через каждые 2 часа.

Нормальная плотность электролита в заряженном аккумуляторе должна быть $1,264 \pm 0,005 \text{ г/см}^3$ при температуре электролита $+20^\circ \text{C}$. Измерять плотность и температуру электролита необходимо в начале заряда через каждые 2 часа, а в конце заряда через каждые 30 мин. В конце заряда плотность электролита доводят до нормальной отсасыванием части электролита и добавлением серной кислоты или дистиллированной воды. Количество добавляемой жидкости можно определять по специальным таблицам, приводимым в инструкциях по эксплуатации аккумуляторов.

По окончании первого заряда необходимо произвести тренировочный разряд номинальным током до тех пор, пока напряжение хотя бы на одном элементе не понизится до 1,7 в, и определить фактическую емкость, которую имеет батарея, приведя эту емкость к температуре $+20^\circ \text{C}$.

Емкость подсчитывается по формулам (1.21) и (1.22).

Емкость первого разряда должна составлять не менее 80% номинальной. В случае соблюдения этого условия аккумулятор считается исправным и после второго заряда—разряда и последующего заряда может быть установлен на самолет.

Второй и последующие заряды производятся в том же режиме, что и нормальный заряд, описанный ниже. Второй тренировочный разряд ведется также током 10-часового разрядного режима. Разрядная емкость должна составлять не менее 85—86% номинальной емкости.

Нормальный заряд производится двумя ступенями тока, сначала током, равным $1,2 I_{\text{ном}}$, а затем — $0,6 I_{\text{ном}}$, переход с первой ступени на вторую производится при напряжении на элементе $2,35 \div 2,40$ в.

Признаки конца нормального заряда те же, что и первого режима заряда. Продолжительность заряда током первой ступени 6—8 час. Продолжительность заряда током второй ступени обычно составляет от 3 до 7 час.

При нормальном заряде аккумулятору необходимо дать 115—120% емкости, полученной от него при предыдущем разряде.

Более продолжительные заряды являются вредными, так как при этом начинается разрушение активного вещества пластин.

Батарей, которые имеют степень разряженности 40% и менее, подлежат только подзаряду током второй ступени нормального заряда до появления признаков конца заряда.

В некоторых случаях, при необходимости быстрого заряда разряженных аккумуляторов, допускаются ускоренные заряды аккумуляторов. Режим заряда устанавливается при этом согласно инструкциям. Ускоренные заряды сокращают срок службы аккумуляторов.

Для предохранения пластин от вредной сульфатации раз в 3 месяца необходимо производить глубокий заряд аккумулятора с последующим глубоким разрядом. Такой глубокий заряд—разряд с определением емкости называется контрольным.

Перед установкой батареи на контрольный заряд—разряд тщательно проверяется состояние каждого элемента и батареи в целом.

Глубокий заряд производится током первой ступени нормального заряда до равномерного интенсивного газообразования. После часового перерыва заряд продолжается током второй ступени нормального заряда вновь до равномерного интенсивного газообразования. Затем делается перерыв на 1 час и снова продолжается заряд током второй ступени и т. д. от 3 до 5 раз, пока сразу за включением батареи на заряд не наступает интенсивное газовыделение.

После глубокого заряда производится тренировочный разряд током 10- или пятичасового разрядного режима и проверяется фактическая емкость батарей. Если после тренировочного разряда батарея покажет приведенную фактическую емкость, более или равную 75% номинальной, то ее ставят на нормальный двухступенчатый заряд, после чего она считается годной к эксплуатации. Если же батарея имеет емкость менее 75% номинальной, то батарея считается неисправной.

Разряд аккумуляторов можно вести при любом токе, не превышающем значение тока 2-минутного режима (согласно данным табл. 1.5).

Разряд аккумулятора ниже определенного для каждого тока конечного напряжения не рекомендуется, так как такие разряды вызывают вредную сульфатацию пластин. Разряд следует прекращать тогда, когда напряжение на одном из элементов достигнет конечного значения.

Аккумуляторы, находящиеся в разряженном состоянии, должны быть не позднее чем через 12 час. установлены на заряд. Хранение аккумуляторов в незаряженном состоянии приводит к вредной сульфатации пластин.

Ввод в эксплуатацию свинцовых сухозаряженных аккумуляторов

Обычно отрицательные пластины, заряженные в конце формирования, при высушивании окисляются кислородом воздуха и при вводе в эксплуатацию новых аккумуляторов с такими пластинами их приходится вновь длительно заряжать (формировать).

Отечественной промышленностью выпускаются авиационные аккумуляторы в сухозаряженном виде. Отличие их от обычных батарей состоит в том, что отрицательные пластины высушиваются специально так, что они при этом не окисляются. Транспортируются и хранятся такие батареи с глухими пробками.

Если сухозаряженную батарею залить электролитом плотностью $1,285 \text{ г/см}^3$ (1,26 для аккумуляторов 12-САМ), то через час после заливки ее можно ввести в эксплуатацию без всякого предварительного заряда. При первом разряде аккумулятор должен отдавать от $\frac{1}{2}$ до $\frac{2}{3}$ номинальной емкости.

В некоторых случаях производится подзаряд сухозаряженных аккумуляторов в течение 3—5 час. током вдвое больше номинального разрядного тока. После этого аккумуляторы могут отдавать полную номинальную емкость.

§ 1.8. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ АВИАЦИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

При техническом обслуживании аккумуляторных батарей необходимо следить за уровнем электролита. Допускать повышение уровня выше щитка нельзя, так как это приводит к выбрызгиванию электролита наружу.

Наружная поверхность аккумулятора должна содержаться в чистоте во избежание излишнего саморазряда.

В процессе эксплуатации следует периодически прочищать пробки. Необходимо особое внимание обращать на закрепление крышки в корпусе пробки, соединение грузика с резиновым клапаном, чистоту вентиляционных каналов.

Одной из часто встречающихся неисправностей аккумуляторов является вредная сульфатация пластин. Под явлением вредной сульфатации понимается образование крупных кристаллов сульфата свинца в толще активной массы. Эти кристаллы при заряде аккумуляторов не переходят в первоначальные активные вещества.

Причинами, вызывающими вредную сульфатацию вследствие неправильной эксплуатации пластин, следует считать: хранение аккумуляторов в незаряженном и полужаряженном состояниях; систематические недозаряды аккумуляторов; применение растворов серной кислоты повышенной концентрации; частые глубокие разряды (ниже конечного напряжения); хранение аккумуляторов при повышенной и колеблющейся температуре; наличие примесей в электролите.

Характерными признаками наличия в аккумуляторе засульфатированных пластин являются: обильное газовыделение, наступающее сразу после включения аккумулятора на заряд; повышенное напряжение на зажимах (3,0 в вместо нормальных 2,06) после включения аккумулятора на заряд.

Один из наиболее рациональных способов уничтожения вредной сульфатации пластин состоит в том, что у аккумулятора выливают электролит, промывают несколько раз дистиллированной водой и заливают электролитом плотностью $1,06 \text{ г/см}^3$. После этого аккумулятор ставят на заряд током 0,1—0,3 от номинального. Когда начинается обильное газо-

выделение и зарядное напряжение и плотность электролита остаются постоянными в течение 2 час., заряд прекращают, после 2—3-часового перерыва заряд повторяют до тех же признаков (всего 3—4 цикла). Признаком начала устранения вредной сульфатации является повышение плотности электролита во время заряда. Признаками полной десульфатации является прекращение роста плотности электролита в течение двух циклов и интенсивное газовыделение в элементах сразу после включения на заряд. После этого аккумулятор разряжают током 10-часового разряда. Если емкость аккумулятора составляет не менее 75—80% номинальной, то он может быть допущен после контрольного заряда—разряда в эксплуатацию.

Процесс устранения вредной сульфатации сопровождается разрушением положительных пластин, поэтому количество циклов при десульфатации не должно превышать четырех.

Кроме описанного выше способа десульфатации пластин, большого внимания заслуживает способ устранения сульфата путем заряда пластин в растворе едкого натра, предложенный одним из видных специалистов аккумуляторной техники Н. Н. Ламтевым.

Определение степени разряженности аккумулятора

Степень разряженности аккумулятора может быть определена следующими способами:

- а) измерением плотности электролита;
- б) измерением напряжения аккумулятора, находящегося под нагрузкой;
- в) измерением напряжения посредством специальных пробников.

В целях более правильного определения состояния аккумулятора целесообразно производить измерения двумя или даже тремя из вышеуказанных способов.

При определении степени разряженности аккумуляторной батареи первым способом измеряют плотность и температуру электролита в элементах аккумуляторной батареи. Плотность электролита измеряют ареометром. Затем по табл. 1.6 находят степень разряженности аккумулятора. При этом должно быть известно значение плотности электролита до начала разряда (плотность электролита заряженного аккумулятора).

Данные таблицы приведены при температуре электролита 20—25° С. Если температура электролита отличается от 20—25° С, то необходимо ввести поправку: на каждый превышающий градус надо прибавить к показаниям ареометра 0,0006, на каждый недостающий градус — отнять 0,0006.

Определение степени разряженности аккумулятора по плотности электролита дает довольно точные результаты, но применять этот способ можно только через 2 часа после отключения батареи от внешней нагрузки (время, необходимое для выравнивания плотности электролита).

Степень разряженности батареи путем измерения напряжения определяют при удвоенном значении тока 10-часового разрядного режима по напряжению отдельных элементов согласно данным табл. 1.7 и находят степень разряженности аккумулятора.

В эксплуатации аккумуляторов наибольшее распространение находит определение степени разряженности аккумулятора с помощью пробника типа АП.

Таблица 1.6

**Значение плотности электролита элементов в зависимости
от степени разряженности
Для батарей типа 12-A**

Состояние аккумулятора	При приведенной к +20°С плотности электролита в конце предыдущего заряда			
	1,250 г/см ³	1,265 г/см ³	1,285 г/см ³	1,300 г/см ³
	Измеренная плотность, приведенная к температуре +20°С			
Полностью разряжен	1,080	1,085	1,090	1,125
Разряжен на 75%	1,125	1,128	1,144	1,166
„ „ 50%	1,170	1,182	1,191	1,210
„ „ 25%	1,210	1,225	1,240	1,252
Полностью заряжен	1,250	1,265	1,285	1,300

Для батарей 12-АО-50

Полностью разряжен	1,110	1,125	1,152	1,170
Разряжен на 75%	1,148	1,161	1,175	1,205
„ „ 50%	1,180	1,196	1,220	1,240
„ „ 25%	1,220	1,234	1,255	1,270
Полностью заряжен	1,250	1,265	1,285	1,300

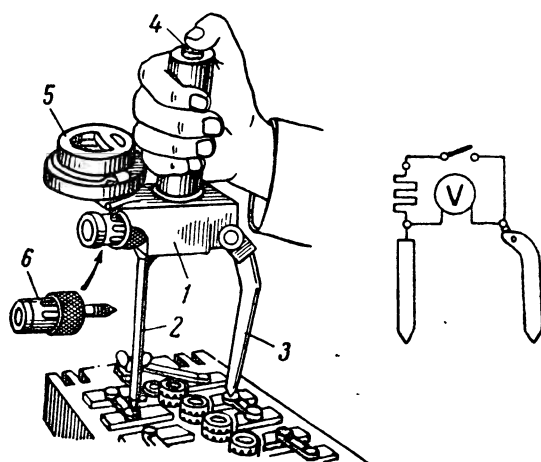
12-САМ-28

Степень разряженности элементов батарей	Плотность электролита, приведенная к 25°С, в г/см ³	
	при разряде 5-часовым режимом током 5,6 а	при стартерном разряде на запуске двигателя
Полностью заряжены	1,255—1,265	1,255—1,265
Разряжены на 25%	1,210—1,220	1,240—1,250
„ „ 50%	1,170—1,180	1,225—1,235
„ „ 75%	1,120—1,130	1,210—1,220
Полностью разряжены	1,070—1,080	1,180—1,210

12-САМ-53

Степень разряжен- ности батарей	Напряже- ние батарей при нагрузке 20 а в в	Плотность электролита в элементах, приведенная к 25°С, в г/см ³	Примечание
Полностью заряжена	25—24	1,260±0,005	Батарея обеспечивает 6 запусков двигателя
Разряжена на 25%	25—24	1,200÷1,210	Обеспечивает 3—4 запуска дви- теля
„ „ 50%	24—23	1,170÷1,160	Запуск двигателя не гарантируется
„ „ 75%	23—22	1,120÷1,110	То же
Полностью разряжена	22—21	1,08÷1,01	—

Пробник, изображенный на фиг. 1. 26, состоит из корпуса с ручкой 1, контактных ножек — неподвижной 2 и подвижной 3, кнопки 4, посред-



Фиг. 1. 26. Пробник для определения разряженности аккумулятора.

1—корпус, 2 и 3—ножки, 4—кнопка для включения сопротивления, 5—вольтметр, 6—сменное сопротивление.

ством которой включаются сменные нагрузочные сопротивления 6, и вольтметра 5.

При проверке состояния аккумулятора в гнездо прибора ввинчивают нагрузочные сопротивления, рассчитанные на получение двойного номинального тока во внешней цепи аккумулятора.

Вольтметром измеряют э. д. с. и напряжение (при нажатой кнопке) элемента аккумулятора под нагрузкой.

По среднему значению напряжения согласно данным табл. 1.7 определяют степень разряженности аккумулятора.

Так как нагрузочное сопротивление прибора неизменно, а напряжение элементов в зависимости от состояния аккумулятора меняется, то ток разряда может быть не равен номинальному. При этом, очевидно, вносится

ошибка в определение степени разряженности аккумулятора, и поэтому результаты, полученные указанным способом, следует сопоставлять с результатами, полученными при измерениях плотности электролита.

Таблица 1.7

Напряжения элементов в зависимости от степени их разряженности

Степень разряженности батареи	Напряжение одного элемента в в
Батарея полностью разряжена	1,70—1,80
Батарея разряжена на 75%	1,85—1,90
„ „ „ 50%	1,94—1,98
„ „ „ 25%	1,99—2,03
Полностью заряженная батарея через 2—6 час. стоянки	2,03—2,07
Полностью заряженная батарея сразу же после окончания заряда	2,10—2,12

§ 1.9. АВИАЦИОННЫЕ ЩЕЛОЧНЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ

До последнего времени щелочные (железоникелевые и кадмиево-никелевые) аккумуляторы не нашли широкого применения в качестве самолетных основных источников электрической энергии. Объясняется это

рядом недостатков, присущих щелочным аккумуляторам по сравнению с кислотными. К этим недостаткам в первую очередь относятся следующие:

1. Более низкий коэффициент отдачи по емкости и по энергии (щелочной аккумулятор $\eta_{\text{Q}}=75-80\%$, $\eta_{\text{A}}=55-65\%$, тогда как кислотный аккумулятор $\eta_{\text{Q}}=80-90\%$, $\eta_{\text{A}}=65-75\%$).

2. Меньшая номинальная величина э. д. с. одного элемента по сравнению с кислотными аккумуляторам (щелочные кадмиевоникелевые — 1,2—1,25 в, кислотные — 2,0 в).

3. Большее падение напряжения во время разряда. При разряде 5-часовым режимом напряжение свинцового аккумулятора уменьшается примерно на 15%, а щелочного — на 30%. Большое падение напряжения, особенно при больших разрядных токах, делает щелочные аккумуляторы мало пригодными для использования их в качестве стартерных батарей.

4. Большая разница между напряжениями разряда и заряда у щелочных аккумуляторов, вследствие чего затрудняется совместная работа генератора, снабженного регулятором напряжения, со щелочным аккумулятором.

5. Меньшая удельная емкость (емкость на единицу веса), чем у свинцовых аккумуляторов, особенно при длительных режимах разряда.

6. Большее относительное уменьшение емкости при понижении температуры (особенно у железоникелевых аккумуляторов).

7. Стоимость щелочных аккумуляторов выше, чем свинцовых.

Однако в настоящее время щелочные аккумуляторы значительно усовершенствованы и разработаны новые типы авиационных щелочных аккумуляторов (кадмиевоникелевые и серебряноцинковые), обладающие рядом преимуществ перед кислотными. Так, например, новые кадмиевоникелевые аккумуляторы при тех же габаритах, что и свинцовые, дают на 90% большую емкость. Эти аккумуляторы обладают большим сроком службы, нетребовательны к уходу в эксплуатации, могут храниться в разряженном и полуразряженном состоянии, нечувствительны к перезаряду и обладают малым саморазрядом.

Другими вновь разработанными химическими источниками тока являются серебряноцинковые аккумуляторы. Достоинством этих аккумуляторов являются высокая отдача (как по емкости, так и по энергии), малые габариты, способность воспринимать высокие скорости заряда (заряд, равный 70—80% номинальной емкости, может быть дан за 15 мин.), высокие стартерные свойства.

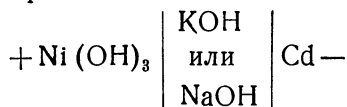
Общие сведения о щелочных аккумуляторах

Щелочные аккумуляторы подразделяются на кадмиевоникелевые, железоникелевые и серебряноцинковые аккумуляторы.

Щелочной кадмиевоникелевый аккумулятор был предложен в 1900 г. Юнгнером, железоникелевый в 1901 г. Эдиссоном.

Серебряноцинковые аккумуляторы были известны уже во времена Вольта.

В основу действия кадмиевоникелевых аккумуляторов положена следующая электрохимическая система:

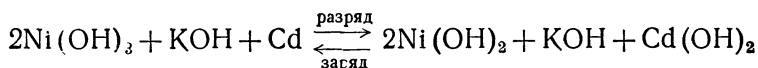


Активным веществом положительного электрода являются окислы никеля, к которым для увеличения электрической проводимости добавляется графит.

Активным веществом отрицательного электрода является губчатый кадмий, к которому добавляется некоторое количество губчатого железа, играющего роль расширителя и предохраняющего кадмий от усадки.

Электролитом служит водный раствор КОН или NaOH.

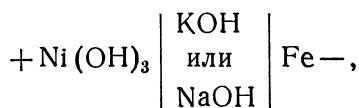
Простейшую схему электрохимических процессов при разряде и заряде аккумулятора можно представить в виде



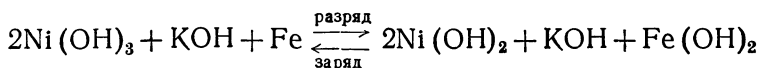
Хотя общее количество электролита КОН в растворе остается всегда постоянным, однако концентрация электролита при разряде понижается у отрицательного электрода и повышается у положительного. При заряде, наоборот, — концентрация щелочи понижается у положительного электрода и повышается у отрицательного.

Приведенные выше уравнения процесса характеризуют его лишь приблизительно.

Действие железоникелевого аккумулятора основано на электрохимической системе:



а реакции при заряде и разряде характеризуются уравнением



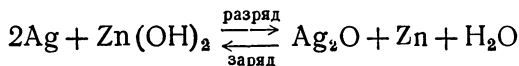
Активным веществом положительного электрода являются также окислы никеля. В некоторых случаях для увеличения электрической проводимости к окислам никеля добавляют лепестки из чистого никеля.

Активным веществом отрицательного электрода является губчатое железо. Для увеличения проводимости и увеличения химической активности железа к нему добавляют 5—6% ртути.

Электролитом служат растворы щелочи КОН или NaOH.

Для увеличения емкости аккумулятора к электролиту добавляют иногда 4—5% LiOH.

Действие серебряноцинковых аккумуляторов основано на электрохимической системе:



Активным веществом положительного электрода является окись серебра, получаемая из химически чистого серебра. Отрицательным электродом служит пористый цинк.

В качестве электролита используется водный раствор КОН с плотностью 1,4 г/см³, который не принимает участия в реакции. Однако он растворяет цинк отрицательных пластин без прохождения тока, образуя водород и гидрат цинка.

Отрицательные электроды обертывают целлофаном, который ограничивает объем электролита вокруг электродов и препятствует образованию токопроводящих мостиков между электродами. В то же время эти диафрагмы хорошо пропитываются электролитом и не препятствуют движению ионов. Число положительных пластин на единицу больше отрицательных. Кривая разряда элемента серебряноцинкового аккумулятора

начинается с 1,86 и падает до 1,0 в. Рабочее напряжение при разряде 1,5—1,6 в. При заряде прежде всего образуется Ag_2O , а потом Ag_2O переходит в Ag. Этот переход связан с повышением потенциала на границе раздела. Вследствие этого зарядное напряжение мгновенно повышается с 1,6 до 1,8 в.

Максимальные зарядные напряжения не рекомендуется повышать более 2,1 в на элемент.

Серебряноцинковые аккумуляторы хорошо сохраняют свою емкость при пониженной температуре: при -10°C она составляет 50 %, а при -20°C около 40 % номинальной емкости.

Главное достоинство серебряноцинковых аккумуляторов заключается в меньшем весе и объеме на единицу емкости.

Глава II

ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 2.1. ОСОБЕННОСТИ САМОЛЕТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НИМ

В большинстве случаев основным источником электрической энергии на современных самолетах являются генераторы. Установленная мощность генераторов электрической энергии на самолетах, участвовавших в Великой Отечественной войне, не превышала 2—3 *квт*; на современных же самолетах она достигает 250 *квт* и имеет тенденцию к дальнейшему росту. Мощность генераторов, установленных на самолете, и число их зависят от размеров и типа самолета. Так, например, на спортивных самолетах, вертолетах и истребителях номинальная мощность генераторов электрической энергии колеблется от 1 до 10 *квт*; на разведчиках разных типов — от 3 до 30 *квт* вследствие более сложного электрооборудования, а на бомбардировщиках и транспортных самолетах она достигает 150—200 *квт* и более.

Эти данные относятся к общей установленной мощности генераторов; номинальная же мощность отдельных генераторов обычно стандартизована.

Применяемая в СССР серия самолетных генераторов постоянного тока имеет обозначение ГСР, что означает «генератор самолетный с расширенным диапазоном скоростей», и следующую шкалу номинальных мощностей: 3000, 6000, 9000, 12 000, 18 000 *вт*¹.

Увеличение установленной мощности потребителей на самолетах привело к тому, что:

- а) аккумуляторные батареи в значительной степени утратили функции буферных и резервных источников электроэнергии;
- б) мощность генераторов постоянного тока в одной единице возросла с 1 до 18,0 *квт*.

По принципу действия авиационные генераторы одинаковы с обычными наземными генераторами промышленного типа, но они существенно отличаются от последних конструктивным выполнением, а также механическими, электрическими, магнитными и тепловыми удельными нагрузками.

В большинстве случаев самолетные генераторы постоянного тока приводятся во вращение от авиационного двигателя; при этом они устанавливаются на боковой или торцевой поверхности двигателя.

¹ До этого отечественной промышленностью выпускались генераторы серии ГС мощностью 350, 500, 650 и 1000 *вт* и ГСК—1500 *вт*.

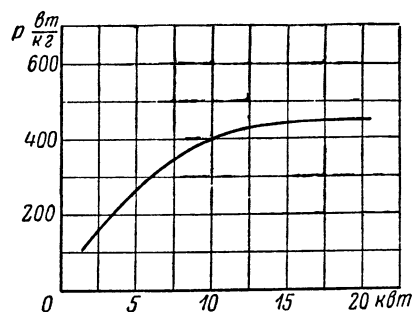
Кроме того, выпускались генераторы ГСН-3000 с диапазоном скоростей вращения от 3800 до 5900 об/мин.

Однако на авиационном двигателе для установки генератора имеется весьма ограниченное пространство, определяемое габаритами самого авиационного двигателя и габаритами его вспомогательных агрегатов.

Трудности размещения генератора на авиационном двигателе вызывают необходимость сокращения размеров генераторов в осевом и поперечном направлениях до минимума. Также приходится ограничивать вес генератора с целью уменьшения в местах крепления механических напряжений, возникающих при вибрациях двигателя и ударных воздействиях.

На фиг. 2.1 приведена кривая удельных мощностей современных самолетных генераторов постоянного тока.

К. п. д. современных самолетных генераторов постоянного тока мощностью 1000—3000 *вт* составляет 0,72—0,75, а для генераторов мощностью 9—18 *квт* — 0,75—0,78.



Фиг. 2.1. Удельные мощности авиационных генераторов.

Для уменьшения веса самолетные генераторы выполняют с большой степенью использования конструктивных материалов и допускают по сравнению с наземными генераторами повышенные скорости вращения и значительно большие плотности тока в обмотках и под щетками.

В самолетных генераторах, рассчитанных на относительно небольшой срок службы, пределы допустимых нагревов, естественно, могут быть значительно выше принятых в промышленном электромашиностроении, где они

выбраны по соображениям длительного срока службы машин, измеряемого в некоторых случаях десятками лет.

Так, для отечественных самолетных генераторов допускаются превышения температуры для коллектора 125° С, а для обмотки якоря 115° С. При этих условиях и температуре окружающей среды +50° С максимально возможные температуры составляют для коллектора 175° С и для обмотки якоря 165° С.

Стремление к уменьшению размеров генераторов заставляет допускать в генераторах сравнительно большие линейные нагрузки AS , равные 200—400 *а/см*. Линейная нагрузка новейших самолетных генераторов примерно вдвое больше, чем у нормальных наземных машин.

При таких значительных линейных нагрузках и плотностях тока, достигающих до 20—25 *а/мм²*, тепловые потери в цепи якоря получаются большими, так как они пропорциональны произведению указанных выше величин. Кроме того, при большом значении AS реактивное напряжение велико, что ухудшает коммутацию.

При напряжениях в 24—30 *в* самолетные генераторы мощностью до 3 *квт*, несмотря на высокие скорости вращения, имеют удовлетворительную коммутацию и выполняются без дополнительных полюсов. Генераторы мощностью от 3 *квт* и выше снабжаются дополнительными полюсами, число которых в случае ограниченности пространства для их размещения обычно в два раза меньше, чем основных полюсов. Самолетные генераторы постоянного тока выполняются также и с полным комплектом дополнительных полюсов.

В некоторых генераторах иностранных самолетов для уменьшения реакции якоря применяются также компенсационные обмотки, проводники которых размещаются в пазах, устроенных в полюсных наконечниках основных полюсов.

Якоря генераторов мощностью до 6 кВт имеют простую волновую обмотку. Этот тип обмотки обеспечивает равенство потокосцепления в каждой параллельной ветви обмотки проводов под полюсами и избавляет от необходимости применения уравнительных соединений. Пазы якоря выполняются открытыми или полузакрытыми, скошенными по продольной оси с целью уменьшения пульсации магнитного потока.

Для генераторов мощностью более 6 кВт применяют петлевую обмотку с уравнительными соединениями.

Иногда самолетные генераторы выполняются также со смешанным возбуждением при относительно небольшом числе ампервитков последовательной обмотки. Роль последовательной обмотки, имеющей полвитка (или один виток) на полюс, заключается в облегчении работы регулятора напряжения, так как диапазон изменения тока возбуждения в этом случае уменьшается.

Специфические условия эксплуатации самолетных генераторов предъявляют особые требования к системам их охлаждения.

Для генераторов с самовентиляцией имеет место уменьшение допустимой мощности с подъемом на высоту, вследствие того что при работе на больших высотах в условиях разреженной атмосферы сильно ухудшаются условия охлаждения.

Как известно, теплоотдача электрической машины, помимо прочих факторов, зависит от разности температур между машиной и окружающей средой и от плотности воздуха. С подъемом на высоту условия, в которых приходится работать генератору, резко изменяются. Снижение температуры воздуха с высотой благоприятно для самолетных генераторов, так как при неизменной максимально допустимой температуре машины это приводит к возможности увеличения допустимого перегрева, т. е. превышения ее температуры над температурой окружающей среды.

Однако начиная с высоты 11 000 м максимальная температура воздуха остается неизменной и равной примерно -40°C , и, следовательно, величина допустимого перегрева при дальнейшем увеличении высоты остается постоянной.

Уменьшение плотности воздуха с ростом высоты ухудшает охлаждение машины вследствие уменьшения коэффициента конвекционной теплоотдачи и весового количества охлаждающего воздуха, проходящего через машину в случае принудительной вентиляции. Таким образом, снижение температуры и уменьшение плотности воздуха с высотой действуют в противоположных направлениях, и в конечном счете влияние высоты на условия охлаждения электрической машины зависит от того, какой из этих факторов преобладает.

Путем улучшения охлаждения можно при сохранении заданного габарита и веса значительно повысить номинальную мощность генератора. В настоящее время в связи с увеличением высотности современных самолетов вопрос охлаждения самолетных генераторов приобрел весьма большое значение. Однако разрешение этой задачи встречает ряд затруднений, связанных с необходимостью дополнительной затраты энергии на вентиляцию и соблюдения некоторых других условий, как, например, простоты конструкции, закрытого выполнения генератора и т. п.

Следует также отметить, что дальнейшее уменьшение веса на единицу мощности в некоторых генераторах за счет улучшения их охлаждения практически ограничено величиной к. п. д. и малой перегрузочной способностью.

Все существующие искусственные способы вентиляции самолетных генераторов можно разделить на две основные группы:

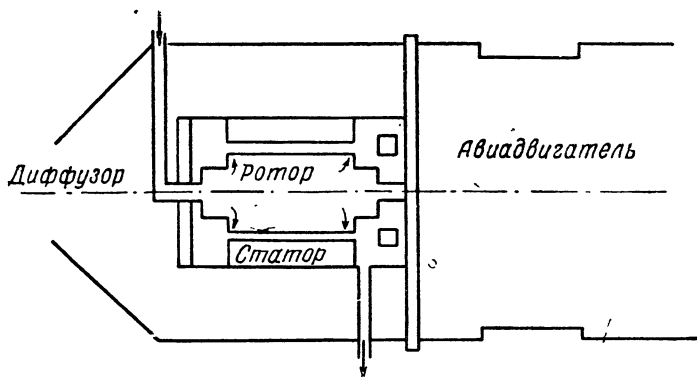
1) с самовентиляцией, осуществляемой специальным вентилятором, насаженным на вал генератора;

2) с посторонней (принудительной) вентиляцией, осуществляемой за счет встречного потока воздуха при полете самолета.

В обоих случаях следует различать две системы вентиляции:

а) систему наружной вентиляции, в которой отвод тепла в окружающую среду производится исключительно с наружной поверхности корпуса генератора, а охлаждающий генератор воздух омывает только наружную поверхность машины и не соприкасается непосредственно с внутренними ее частями, где происходит выделение тепла (обмотки, коллектор);

б) систему внутренней вентиляции, в которой охлаждающий воздух поступает внутрь генератора и отводит тепло непосредственно от тех его частей, где выделяется тепло.



Фиг. 2. 2. Генератор с охлаждением испаряющейся жидкостью.

Наиболее эффективное охлаждение для самолетных генераторов достигается путем продува встречным потоком воздуха. Генераторы, рассчитанные на принудительную вентиляцию, при работе без продува снижают свою удельную мощность примерно в 3—5 раз.

В последнее время отечественной промышленностью достигнуты большие успехи в направлении повышения удельной мощности самолетных генераторов.

При полетах на высоте свыше 18—20 км количество воздуха, которое может быть пропущено через охлаждаемую машину, значительно сокращается.

Кроме того, при больших скоростях полета температура воздуха, поступающего для охлаждения генератора, сильно возрастает по сравнению с температурой атмосферного воздуха и может достигать 120—150° С. При этих условиях исключается возможность использования охлаждения машин продувом.

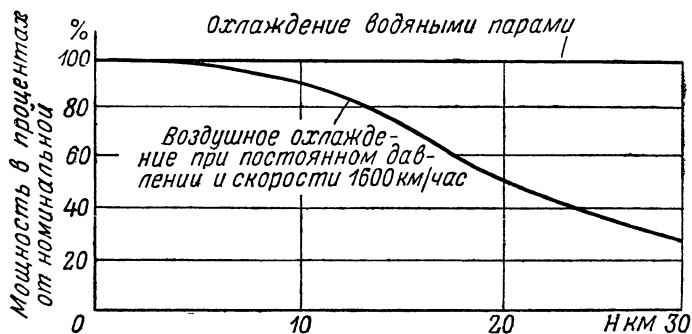
Охлаждение машин в этих случаях можно осуществлять посредством охлаждающего действия испаряющейся жидкости, например, воды или применения турбоохладительных установок, основанных на охлаждении воздуха в результате его адиабатического расширения.

Примером охлаждения генератора посредством испаряющейся жидкости может служить установка, изображенная на фиг. 2. 2.

Охлаждающая жидкость из резервуара вводится в полый вал генератора под давлением и благодаря воздействию центробежных сил проходит через отверстия к внутренней поверхности машины. Выделяющееся тепло в машине передается жидкости, которая нагревается и испаряется.

Вследствие того что на испарение жидкости затрачивается большое количество тепла, происходит интенсивное охлаждение машины. Получающийся в результате испарения пар отводится через специальный клапан.

Поток, поступающий для охлаждения жидкости, регулируется автоматически, с помощью клапана, который управляется посредством чувствительного элемента, устанавливаемого в корпусе машины. С целью



Фиг. 2.3. Зависимость мощности генератора от высоты полета.

уменьшения притока тепла из окружающей атмосферы корпус машины покрыт специальной теплоизоляцией.

Зависимость мощности, отдаваемой генератором, от высоты полета при использовании охлаждения продувом воздуха и охлаждающей жидкостью указана на фиг. 2.3.

Описанная система с успехом может быть использована для генераторов как постоянного, так и переменного токов.

§ 2. 2. ЩЕТКИ И ЩЕТОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА САМОЛЕТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Для нормальной работы самолетных генераторов постоянного тока весьма важное значение имеет надежный токосъем на коллекторе посредством щеток.

Специфические условия, в которых приходится работать самолетным генераторам (вибрация, изменения температуры, давления и влажности атмосферы в широком диапазоне), заставляют обращать особое внимание на устройство щеткодержателей, подбор материала для щеток, с тем чтобы обеспечить совершенную коммутацию и небольшой износ самих щеток и коллектора.

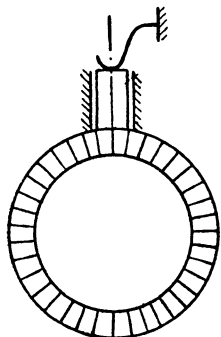
К щеточному контакту самолетных генераторов постоянного тока предъявляются следующие основные требования:

- 1) коммутация должна быть совершенной;
- 2) щеткодержатели должны быть сконструированы так, чтобы щетки не отскакивали от коллектора под действием вибраций, сотрясений и вследствие неровностей и эксцентриситета коллектора;
- 3) во избежание разрядов на поверхности коллектора расстояния между точками, имеющими наибольшую разность потенциалов, должны быть по возможности большими (не менее 5 мм для коллекторов генераторов постоянного тока с напряжением в 30 в).

Для облегчения условий коммутации щетки должны обладать относительно большим переходным сопротивлением; вследствие этого падение

напряжения на паре щеток — положительной и отрицательной — в самолетных генераторах напряжения 28—30 в составляет примерно 5—8% номинального напряжения, что приводит к увеличению электрических потерь на коллекторе.

В генераторах, предназначенных для установки на различные направления вращения, применяют радиальные щеткодержатели со щетками, расположенными перпендикулярно к поверхности коллектора (фиг. 2.4).



Фиг. 2.4. Расположение щетки в радиальном щеткодержателе.

При одностороннем вращении якоря обычно применяют щеткодержатели, в которых ось щетки повернута в сторону направления вращения коллектора (реактивные щеткодержатели).

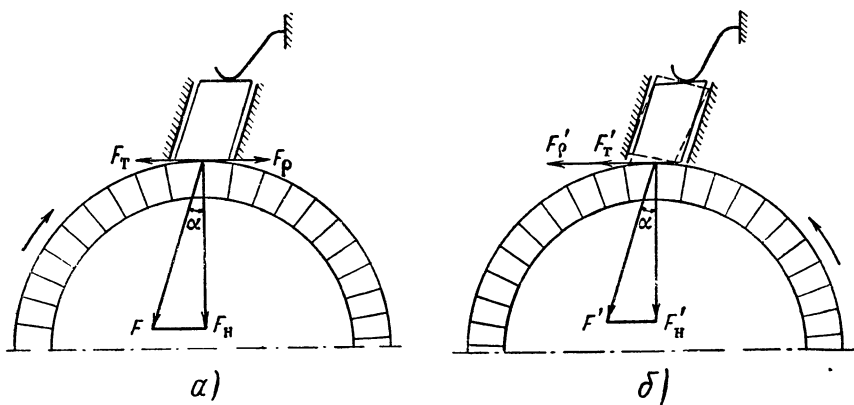
На фиг. 2.5,а указано правильное, а на фиг. 2.5,б неправильное положение щеток относительно направления вращения коллектора.

Если щетка установлена наклонно по отношению к коллектору, то силу нажатия пружины F на щетку можно разложить на вертикальную $F_n = F \cos \alpha$ и горизонтальную $F_t = F \sin \alpha$ составляющие. Сила трения F_p , приложенная к щетке, всегда действует по направлению вращения.

При положении, указанном на фиг. 2.5,б, сила трения F'_p и составляющая $F'_t = F' \sin \alpha$ силы нажатия пружины выворачивают щетку из обоймы, и щетка стремится занять положение, изображенное на фиг. 2.5,б пунктиром. При этом поверхность соприкосновения щетки и коллектора уменьшается, увеличивается плотность тока в щеточном контакте и, следовательно, ухудшается токосъем и возникает опасность заклинивания щетки.

Сила, выворачивающая щетку, равна

$$F'_b = F' \sin \alpha + F'_p. \quad (2.1)$$



Фиг. 2.5. Расположение щетки относительно направления вращения коллектора. а — правильное; б — неправильное.

Если щетка установлена правильно (фиг. 2.5,а), то сила, выворачивающая щетку, уменьшается:

$$F'_b = F \sin \alpha - F_p. \quad (2.2)$$

Для того чтобы выворачивающая щетку сила была равна нулю, необходимо:

$$F \sin \alpha = F_p. \quad (2.3)$$

Так как $F_p = \rho F \cos \alpha$, где ρ — коэффициент трения, то

$$F \sin \alpha = \rho F \cos \alpha \quad (2.4)$$

или

$$\rho = \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.5)$$

Таким образом, щетка плотно прилегает к коллектору, при условии что тангенс угла наклона щетки равен коэффициенту трения щетки о коллектор. Это положение справедливо только в идеальном случае, т. е. при отсутствии вибраций щетки.

В быстроходных электрических машинах, к числу которых принадлежат самолетные генераторы, сравнительно небольшой эксцентриситет коллектора может вызывать значительные динамические усилия, действующие на щетку, величина которых в некоторых случаях способна уравновесить действие нажимной пружины щеткодержателя. Это обстоятельство влечет за собой отставание щетки от поверхности коллектора, ухудшение коммутации и чрезмерное падение напряжения в переходном контакте.

Для надлежащего контакта между щеткой и коллектором необходимо установить не только определенную силу нажатия, но и правильно выбрать собственную частоту колебаний.

Практически собственную частоту колебаний (угловую скорость ω_0) системы выбирают из условия

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_f}{m}} \geq 1,5 \omega_{\max}, \quad (2.6)$$

где m — масса щетки, $\omega_{\max}$ — максимальная угловая скорость вращения коллектора, K_f — жесткость пружины.

При расчете за массу щетки следует принимать массу новой щетки, еще не находившейся в эксплуатации.

Поперечное сечение щетки $s_q = s \cos \alpha$, а $s = \frac{I_{\text{щ}}}{j_{\text{щ}}}$, где $I_{\text{щ}}$ — величина тока на один щеточный болт, а $j_{\text{щ}}$ — допустимая плотность тока под щеткой.

Зная высоту щетки, находят ее объем и по максимальной массе определяют жесткость пружины:

$$K_f = m(1,5 \omega_{\max})^2. \quad (2.7)$$

Для того чтобы обеспечить надежный контакт при вибрациях щетки, приходится применять большие удельные нажатия на щетки, доходящие до 500—600 г/см², а для быстроходных генераторов ($n \geq 9000$ об/мин) сила удельного нажатия может составлять 750—900 г/см². Как известно, для наземных генераторов эта сила не превышает 200—400 г/см².

В то же время износ щеток, несмотря на значительное удельное нажатие, должен быть достаточно мал, независимо от условий работы генератора.

Для надежного контакта необходимо предотвратить поперечное перемещение щетки в щеткодержателе и добиться, чтобы прижимной механизм не создавал боковых усилий. Кроме того, щеткодержатель должен обеспечить беспрепятственное перемещение щетки по высоте, с тем чтобы щетка могла легко следовать за неровностями коллектора.

Токосъем сильно зависит от материала коллектора и щеток. В нормальных генераторах коллектор выполняют из красной меди, в самолетных генераторах — из меднокадмиевых сплавов.

Высотные характеристики щеток. Щетки, применяемые на самолетных генераторах, должны иметь по возможности постоянные характеристики при значительных изменениях окружающей температуры, влажности и плотности воздуха.

В этом отношении весьма существенным является вопрос о работе щеток на больших высотах, так как коэффициент трения в сильной степени зависит от атмосферных условий.

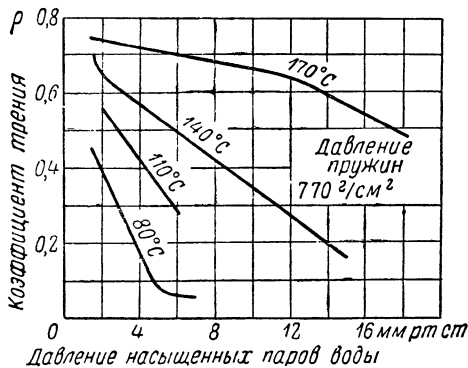
Как известно, с изменением высоты резко изменяются давление воздуха, температура и содержание влаги.

Количество насыщенного водяного пара в атмосфере с увеличением высоты уменьшается с $12,5 \text{ г/м}^3$ на уровне моря до 35 мг/м^3 на высоте 10 000 м.

Исследования показывают, что при пониженной влажности и с понижением парциального давления кислорода чрезвычайно быстро изнашиваются обычные щетки. Уменьшение

влажности влияет на износ щеток в большей степени, чем снижение содержания кислорода.

Коэффициент трения как графитированных, так и медноугольных щеток с понижением влажности возрастает. Коэффициент трения зависит также от температуры щеток. Чем выше температура щеток, тем большее значение имеет коэффициент трения при той же влажности воздуха. Как видно из фиг. 2.6, на которой приведены кривые, показывающие зависимость коэффициента трения от изменения давления паров воды при различных температурах. При давлении паров воды от



Фиг. 2.6. Зависимость коэффициента трения медноугольных щеток от давления паров воды при различных температурах.

5 мм рт. ст. и выше коэффициент трения мал и щетки имеют небольшой износ, если температура их не превышает 80° С.

Существенное влияние на коэффициент трения оказывает также содержание кислорода. При работе щеток в атмосфере сухого кислорода коэффициент трения щеток на коллекторе увеличивается с понижением давления кислорода. На фиг. 2.7 приведены кривые, показывающие изменение коэффициента трения медноугольной щетки в зависимости от давления кислорода.

В диапазоне изменения давления кислорода от 0 до 160 мм рт. ст. коэффициент трения находится почти в линейной зависимости от давления кислорода.

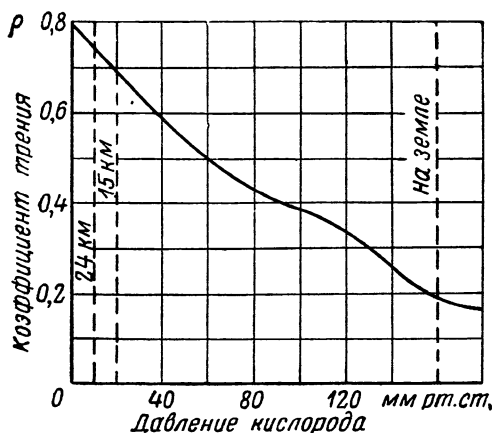
Зависимость скорости износа щеток в атмосфере сухого кислорода при постоянной температуре от коэффициента трения изображена на фиг. 2.8. Из кривых на фиг. 2.7 и 2.8 видно, что при давлении кислорода, соответствующем наземным условиям, коэффициент трения примерно равен 0,19 и износ составляет 0,5—0,7 мм/час. При давлении, соответствующем высоте 15 000 м, коэффициент трения равен 0,68 и износ щеток при этом более 18 мм/час.

При коэффициентах трения от 0,3 до 0,6 износ щеток прямо пропорционален коэффициенту трения.

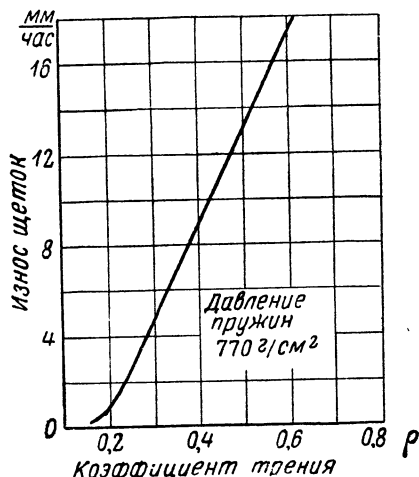
Кривые фиг. 2.8 показывают, что даже при парциальном давлении кислорода порядка 140—160 мм рт. ст. (на высотах до 1000 м), при условии нулевой влажности, износ щеток уже велик — 0,5 мм/час. При парциальных давлениях сухого кислорода ниже 120 мм рт. ст., соответствующих высотам порядка 1000—2000 м, износ щеток становится практически недопустимым. Это позволяет заключить, что поддержание парциального давления кислорода, соответствующего наземным условиям, при нулевой влажности не обеспечивает нормальной работы щеток.

Для предотвращения чрезмерного износа щеток необходимо наличие в атмосфере паров воды. Ускоренный износ щеток при работе в высотных условиях объясняется следующими причинами.

При работе машины в нормальных атмосферных условиях поверхность коллекторных пластин покрывается тончайшей пленкой, разделяющей трущиеся поверхности. Пленка на коллекторе состоит как бы из двух слоев: слоя окиси меди и слоя графита. Толщина пленки составляет 0,05—0,06 мк.



Фиг. 2.7. Зависимость коэффициента трения медноугольных щеток от давления кислорода (давление пружин на щетки 770 г/см²).



Фиг. 2.8. Износ графитизированных щеток в зависимости от коэффициента трения в атмосфере сухого кислорода.

Слой окиси меди образуется вследствие соединения меди с кислородом воздуха и кислородом, образующимся в результате электролиза воды, при прохождении электрического тока через щетку и коллектор. Слой графита образуется за счет истирания самой щетки.

Пограничный слой поглощает пары воды и кислород из воздуха, и, таким образом, между щеткой и коллектором появляется тонкая пленка воды (мономолекулярный слой воды), являющаяся в данном случае смазывающим слоем. Вследствие этого уменьшаются трение между поверхностями и износ щеток.

При уменьшении содержания влаги и кислорода в атмосфере воздуха с подъемом на высоту щеточно-коллекторный узел самолетного генератора не может нормально работать в высотных условиях из-за большого износа щеток.

Для нормальной работы необходимы мероприятия, позволяющие заменить исчезающую на высотах пленку на коллекторе во избежание увеличения коэффициента трения выше допустимого предела.

Так как естественный смазывающий слой при работе обычных щеток в высотных условиях отсутствует, то современные щетки самолетных генераторов пропитываются веществами, которые в процессе работы сами создают смазывающий слой. Эти вещества должны быть достаточно термостойкими, чтобы не улетучиваться и не разлагаться при температуре, до которой могут нагреваться щетки во время работы, не должны загрязнять коллектор и вызывать увеличения потерь в контакте. В качестве таких веществ пытались использовать различные галоидные соединения. Испытания щеток, пропитанных этим соединением, показывают, что в летных условиях на больших высотах щетки имеют нормальный износ. К недостаткам такого рода щеток следует отнести то, что металлические галоиды абсорбируют влагу и растворяются в ней. Кроме того, термически малоустойчивые галоиды образуют продукты разложения, разрушающие искусственно образующийся смазывающий слой.

В полетах до высот в 20 км в качестве смазки поверхности коллектора применяются мягкие металлы.

В ряде случаев уменьшение изнашиваемости щеток при низкой влажности на больших высотах достигается также путем добавления в массу, применяемую для изготовления графитовых щеток, сернокислого кальция или окиси бария. При этом необходимая влажность обеспечивается за счет освобождения влаги, поглощенной щетками в условиях нормальной влажности.

Кроме пропитки рабочих щеток, для создания смазывающего слоя иногда устанавливают так называемые ложные щетки из специального смазывающего вещества, изолированные от электрических цепей генератора.

За последнее время в связи с применением парового охлаждения самолетных генераторов пар используется также для уменьшения износа щеток; с этой целью коллектор электрической машины обдувается паром.

Следует отметить, что с ростом мощности самолетных генераторов и увеличением высотности самолетов требуются дальнейшие исследования по изысканию и усовершенствованию высококачественных щеток как важнейшего элемента, обеспечивающего удовлетворительную работу самолетного генератора.

В генераторах серии ГС при работе на высотах до 10 000 м применяются электрографитированные щетки марки ЭГ-8. Износ этих щеток после 100 час. работы на генераторе не превышает 0,7 мм. Щетки других типов (угольнографитовые, меднографитовые) не обеспечивают нормальной работы генераторов серии ГС вследствие высоких температур коллектора и больших скоростей вращения генератора. Для генераторов типа ГСР применяются специальные высотные щетки марки МГС.

§ 2.3. ПРИВОД САМОЛЕТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Самолетные генераторы приводятся во вращение различными способами, к числу которых относятся:

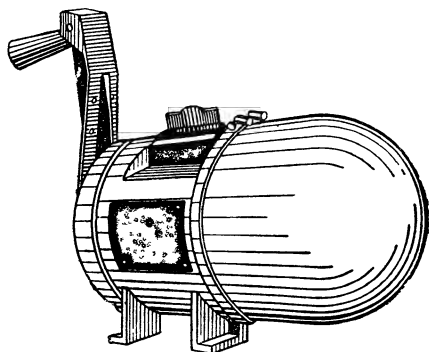
Ручной привод. Этот привод является наиболее простым и применяется в исключительных случаях, главным образом в аварийных генераторных установках, служащих для питания радиостанций; он также используется для вращения специальных или запасных генераторов (для освещения и т. п.). Типичным примером такого генератора с ручным приводом является генератор, изображенный на фиг. 2.9,

предназначенный для питания самолетного радиопередатчика. Самолетные генераторы с ручным приводом обычно конструктивно связаны с передачей.

Генератор при наличии ручного привода рассчитывается на скорость вращения 5800—8000 об/мин. Скорость вращения рукоятки редуктора составляет 80—110 об/мин.

Мощность генератора не превышает 20—25 вт. Напряжение генератора поддерживается постоянным с помощью вибрационного регулятора напряжения.

Привод от ветрянки. Этот вид привода был распространен при небольших скоростях полета самолета. На вал генератора насаживается пропеллер, приводимый во вращение встречным потоком воздуха при полете самолета. В случае постоянного шага ветрянки скорость вращения генератора зависит от скорости полета, поэтому в дальнейшем были предложены ветрянки с автоматическим изменением шага винта. При помощи специального центростремительного устройства скорость вращения таких ветрянок изменялась незначительно, а поэтому напряжение генератора оставалось также почти постоянным и можно было обходиться без автоматического регулятора напряжения. Это обстоятельство способствовало в свое время широкому распространению такого привода.



Фиг. 2.9. Генератор с ручным приводом для питания радиопередатчика.

Однако с возрастанием скорости полета и увеличением мощности генераторов наличие ветрянок сильно увеличивает лобовое сопротивление самолета и снижает возможную скорость полета. Поэтому на современных быстроходных самолетах этот тип привода не применяется. Он сохранился только на туристических, учебных и т. п. самолетах, а также на планерах, скорость полета которых относительно невелика.

Индивидуальный привод. Для приведения во вращение генераторов в ряде случаев используются специальные двигатели (поршневые или газотурбинные) соответствующей мощности. При таком способе привода работа генератора совершенно не зависит от работы авиационного двигателя и генератор может питать бортовую сеть не только во время полета, но и при стоянке самолета.

Преимущества генераторных установок с индивидуальным приводом состоят также в том, что генератор и приводной двигатель могут быть установлены в месте, доступном для обслуживания и в полете самолета. Генераторы, предназначенные для работы на одной скорости вращения, могут иметь меньший вес, чем генераторы, работающие в широком диапазоне изменения скорости вращения. Наконец, при наличии индивидуального привода сравнительно просто осуществляется параллельная работа генераторов переменного тока.

Однако подобного рода привод имеет в настоящее время ограниченное применение и используется в основном на больших транспортных и военных самолетах, а также на буксирных планерах.

В большинстве случаев генераторы с индивидуальным приводом используются как аварийные или резервные источники питания или как источники, предназначенные специально для запуска авиадвигателей.

К недостаткам индивидуального привода следует отнести то, что поршневые двигатели малой мощности имеют сравнительно большой удельный вес (кг/л. с.) и что при полете на больших высотах возникают затруднения с наддувом двигателя.

Газовые турбины небольшой мощности для привода генераторов постоянного тока пока еще не нашли широкого применения, однако использование таких установок весьма рационально.

Привод генератора от авиационного двигателя. Приведение в движение генератора от авиационного поршневого двигателя сопряжено с рядом затруднений.

Как известно, диапазон рабочих скоростей генераторов самолетного типа составляет 4000—9000 об/мин, тогда как максимальная скорость вращения коленчатого вала авиационных двигателей обычно не превышает 3000 об/мин.

Это обстоятельство требует применения редуктора с передаточным числом в среднем от 1,4 до 3,0 в зависимости от типа генератора и двигателя.

Все поршневые авиационные двигатели обладают неравномерностью хода вследствие неуравновешенности подвижных масс, изменения крутящего момента за период каждого такта рабочего цикла (вспышка, выхлоп, всасывание, сжатие и т. п.), поэтому мгновенные значения скорости вращения и крутящего момента коленчатого вала не остаются постоянными в течение одного оборота.

При определенном числе цилиндров N число вспышек для четырехтактного двигателя на один оборот равно $\frac{N}{2}$ (для двухтактного — N);

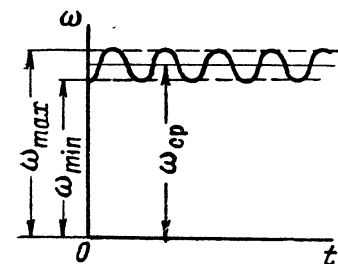
таким образом, коленчатый вал за один оборот получает $\frac{N}{2}$ — импульсов, вызывающих пульсации момента по времени, причем эти пульсации носят весьма сложный характер.

Если крутящий момент непостоянен и периодически изменяется, пульсируя $\frac{N}{2}$ раз за один оборот вала двигателя, а сопротивление винта создает примерно постоянный нагрузочный момент, то мгновенная угловая скорость вращения двигателя не постоянна, а меняется в пределах от $\omega_{\max}$ до $\omega_{\min}$, совершая колебания около среднего значения $\omega_{\text{ср}}$ (фиг. 2.10); двигатель имеет определенную степень неравномерности скорости вращения (хода), равную

$$\delta = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\omega_{\text{ср}}}. \quad (2.8)$$

Амплитуда пульсаций угловой скорости вращения коленчатого вала авиадвигателя равна $\frac{\delta}{2} \omega_{\text{ср}}$. Легко понять, что самолетный генератор, жестко сцепленный с коленчатым валом непосредственно или при помощи зубчатой передачи с передаточным числом i , должен вращаться с той же неравномерностью хода, как и коленчатый вал двигателя, но амплитуда пульсаций скорости вращения генератора получается равной

$$\Delta \omega_r = \frac{\delta}{2} i \omega_{\text{ср}}.$$



Фиг. 2.10. Колебания скорости вращения двигателя вследствие неравномерности хода.

Вследствие этого момент на валу генератора обуславливается не только моментом статической нагрузки генератора, но также и динамическим моментом, вызванным наличием маховых масс, причем максимальная величина последнего может намного превосходить момент статической нагрузки.

Вследствие неравномерности хода вал двигателя испытывает упругие деформации в виде крутильных колебаний, амплитуды которых различны вдоль оси вала. Эти амплитуды оказываются наименьшими в местах, более близких к месту, где имеется маховая масса с наибольшим моментом инерции, и возрастают по мере удаления от него.

В авиационных двигателях такой массой является винт, для которого момент инерции J_v примерно в пять раз (для трехлопастных винтов в 10 раз) больше, чем для всех остальных вращающихся и подвижных частей двигателя, связанных с коленчатым валом.

Характер нарастания амплитуд крутильных колебаний вдоль оси вала 12-цилиндрового двигателя с V-образным расположением цилиндров по мере удаления от винта приближенно изображен в виде пунктирной линии на фиг. 2.11.

Из сказанного вытекает, что не безразлично, от какого места коленчатого вала брать привод к генератору. Ясно, что чем ближе механизм привода расположен к винту, тем лучше условия для приведения во вращение генератора, однако по разному рода причинам это не всегда удается сделать. Например, в двигателе ВК-105 зубчатые колеса привода расположены почти у носка двигателя, в некоторых же случаях ответвление привода берется в середине коленчатого вала, а иногда даже ближе к хвосту (приблизительно на $1/4$ длины вала, считая от хвоста).

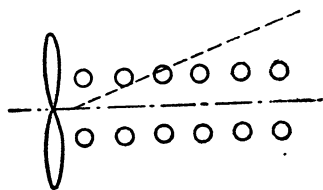
Кроме деформаций коленчатого вала, могут иметь место упругие деформации и в самом приводе, в котором, кроме того, могут иногда применяться специальные эластичные валы. Величина изменений угла закручивания вала двигателя $\Delta \alpha_{дв}$ вследствие крутильных колебаний вала может достигать $1-2^\circ$. Эти крутильные колебания вызывают возрастание неравномерности вращения приводного вала.

Для ограничения величины момента на валу генератора применяют специальные ограничители (фрикционные муфты или муфты трения), которые вставляются между ведущим и ведомым валами.

Обычный тип фрикциона представляет собой набор стальных дисков, сжатых пружинами, причем эти диски поочередно жестко связаны с ведущим и ведомым валами, так что вращение от ведущего вала передается ведомому через трение, возникающее между этими дисками. Статический момент трения такого фрикциона зависит от силы, с которой диски фрикционной муфты прижимаются друг к другу под действием пружин.

Момент трения фрикционной муфты выбирают примерно в пять раз большим, чем момент сопротивления при полной нагрузке. При больших моментах начинается проскальзывание дисков во фрикционе, который в этом случае играет роль как бы предохранителя от механических перегрузок.

Иногда таким предохранителем может служить сам валик привода, который для этой цели выполняется не одинакового сечения по длине, а с утоньшением на одном конце. В случае перегрузки такой валик



Фиг. 2.11. Нарастание амплитуд крутильных колебаний вдоль оси вала двигателя.

срезается в ослабленном сечении, но сам самолетный генератор и авиационный двигатель остаются невредимыми.

Подобного рода перегрузки могут возникать от заклинивания и других механических повреждений, от увеличения неравномерности хода вследствие порчи винта самолета (пробой пульей, изогнутость) и т. п.

Для смягчения толчков и уменьшения влияния неравномерности хода двигателя сцепление генератора с приводом делается не жесткое, а эластичное, при помощи специальных муфт, в которых могут возникать большие упругие деформации. Во многих случаях сцепление генератора с приводом производится при помощи эластичного вала, проходящего внутри полого вала якоря генератора и имеющего на свободном конце шлицы для сцепления с валиком привода.

Все устройства подобного рода дают возможность осуществлять упругую связь между ведущей и ведомой частями, при которой можно значительно уменьшить амплитуду колебаний якоря генератора или ротора синхронного генератора.

Но для того чтобы эластичный вал или упругая муфта действительно уменьшали амплитуду колебаний, необходимо правильно выбрать соотношения между собственной частотой ведомой части привода генератора ω_0 и минимальной частотой вынужденных колебаний вала авиационного двигателя $\omega_{1\min}$, а именно:

$$\omega_{1\min} = \frac{N}{2} \omega_{\text{дв min}} > (1,5 \div 2,0) \omega_0. \quad (2.9)$$

Зная момент инерции вращающихся частей генератора J , легко определить жесткость муфты или эластичного вала K , отвечающую требуемой угловой скорости ω_0 собственных колебаний:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{J}}. \quad (2.10)$$

Угловые ускорения вала двигателя, которые образуются при разгоне и торможении двигателя, вызывают также динамические крутящие моменты в валу генератора, но, как показывают расчеты, эти моменты получаются значительно меньше моментов, вызванных вынужденными колебаниями от неравномерности хода авиадвигателя.

При приводе во вращение самолетного генератора от авиационного двигателя генератор устанавливается непосредственно на самом двигателе, причем в зависимости от конструкции привода место установки его и способы крепления могут быть различными для отдельных типов двигателей.

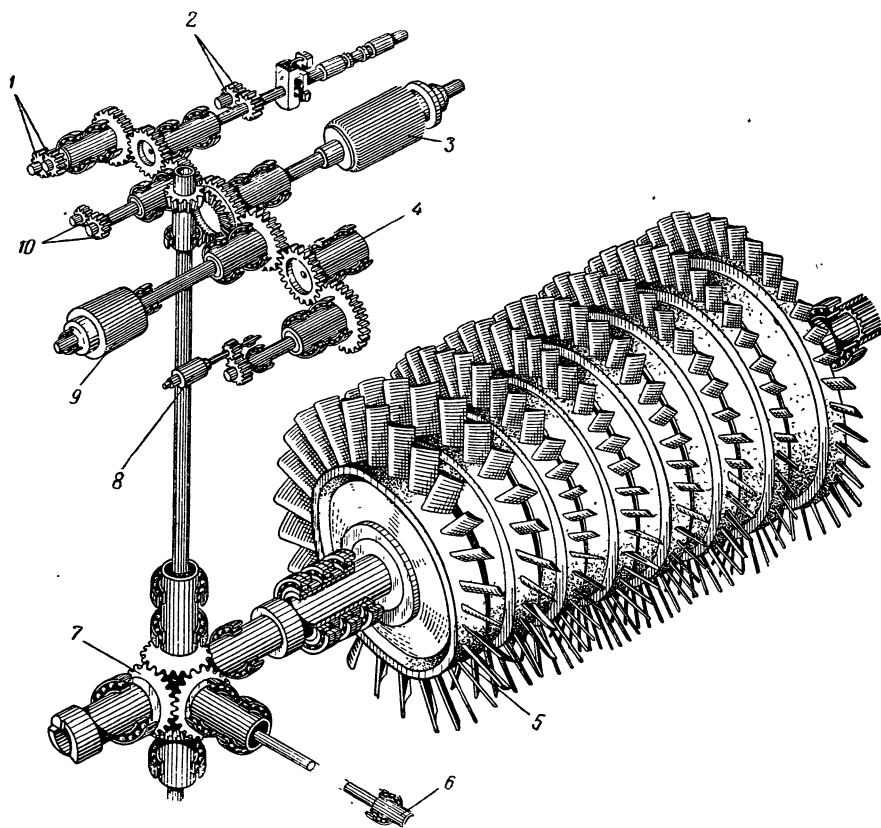
Обычно применяется фланцевое крепление генератора, причем генераторы, как правило, устанавливаются в горизонтальном или слегка наклонном положении.

На самолетах с реактивными двигателями привод генератора осуществляется по кинематической схеме, изображенной на фиг. 2. 12. Ведущее коническое зубчатое колесо получает вращение от компрессора через рессору и входит в зацепление одновременно с тремя зубчатыми колесами: колесом привода переднего масляного насоса, колесом ручного привода и колесом привода коробки агрегатов.

Вращение от этих зубчатых колес передается через длинные рессорные валики, которые вращаются с той же скоростью, что и ротор двигателя. Верхний вертикальный валик-рессора вращает коническое зубчатое колесо, которое входит в зацепление с коническим зубчатым венцом двойного зубчатого колеса привода генератора. Передаточное число от вала двигателя к генератору обычно составляет 0,65—0,8.

Следует отметить, что условия работы генератора на реактивных двигателях с точки зрения вибропрочности и виброустойчивости несколько легче, чем на поршневых двигателях, вследствие того, что реактивные двигатели обладают значительно меньшей неравномерностью хода по сравнению с поршневыми двигателями.

В ряде случаев генератор, установленный на двигателе, используется также и для запуска реактивного двигателя. Такой генератор носит



Фиг. 2.12. Привод генератора на реактивном двигателе.

1—зубчатые колеса топливного насоса, 2—зубчатые колеса насоса регулятора оборотов, 3—ротор генератора, 4—запасный привод, 5—ротор компрессора, 6—ручной привод, 7—ведущее зубчатое колесо центральной передачи, 8—ротор таходинamo, 9—ротор воздухоотделителя, 10—зубчатые колеса насоса подъема шасси.

название стартер-генератора и отличается от обычных генераторов серии ГСР наличием дополнительной последовательной обмотки возбуждения, которая используется при работе генератора в режиме двигателя (стартера). Таким образом, в режиме двигателя электрическая машина работает как двигатель смешанного возбуждения.

После окончания запуска последовательная обмотка автоматически отключается и машина переводится в режим генератора с параллельным возбуждением.

Инерционный привод. Этот способ привода применяется в тех случаях, когда генератор должен работать небольшой промежуток времени (до 2 мин.). На вал генератора насаживают маховик, обладающий большим моментом инерции. Для приведения в действие генератора маховик раскручивают до определенной скорости вращения, используя для этой цели генератор в качестве электродвигателя. При этом питание

двигателя осуществляется от постороннего источника электрической энергии. Когда питание двигателя прекращается, кинетическая энергия, запасенная маховиком, начинает преобразовываться в электрическую энергию. Генератор вращается и снабжает определенных потребителей электрической энергией до тех пор, пока почти полностью не будет использован запас механической энергии, сообщенной первоначально маховику. Такой вид привода находит применение на специальных телеуправляемых объектах и самолетах-снарядах.

Как уже было указано, генератор при наличии инерционного привода первоначально раскручивается до определенной скорости вращения $\omega_{\max}$, работая электродвигателем.

К моменту отключения его от питающей бортовой сети вращающиеся части генератора (маховик, якорь) обладают запасом живой силы:

$$A = \frac{1}{2} J \omega_{\max}^2, \quad (2.11)$$

где J — момент инерции маховика и якоря генератора.

После отключения генератора от питающей сети скорость вращения его постепенно уменьшается. Если на зажимы генератора присоединены потребители электрической энергии, то при этом происходит превращение запасенной маховиком кинетической энергии в электрическую энергию, т. е.

$$\frac{1}{2} J (\omega_{\max}^2 - \omega^2) = \int_0^t \frac{P}{\eta} dt, \quad (2.12)$$

где P — мощность потребителей, включенных на зажимы генератора;
 η — коэффициент полезного действия генератора.

Если предположить, что мощность, потребляемая от генератора, и к. п. д. его в течение всего времени его работы с инерционным приводом постоянны, т. е. $P = \text{const}$ и $\eta = \text{const}$, то

$$\frac{1}{2} J (\omega_{\max}^2 - \omega^2) = \frac{P}{\eta} t \quad (2.13)$$

или

$$\omega^2 = \omega_{\max}^2 \left[1 - \frac{Pt}{J \frac{\omega_{\max}^2}{2}} \right] = \omega_{\max}^2 \left[1 - \frac{Pt}{\eta A} \right]. \quad (2.14)$$

Мощность, подводимая к генератору,

$$P_1 = \frac{P}{\eta}. \quad (2.15)$$

Обозначив

$K_\omega = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}}$ — кратность уменьшения скорости вращения;

$T_m = \frac{1}{2} J \omega_{\min}^2 : P_1$ — постоянная времени разгона или электромеханическая постоянная,

получают из (2.14)

$$\omega^2 = K_\omega^2 \omega_{\min}^2 \left[1 - \frac{t}{T_m K_\omega^2} \right]. \quad (2.16)$$

Таким образом, выражение для мгновенного значения скорости вращения генератора при $P=\text{const}$ и $\eta=\text{const}$ имеет вид

$$\omega = K_{\omega} \omega_{\min} \sqrt{1 - \frac{t}{T_M K_{\omega}^2}}. \quad (2.17)$$

Из последнего выражения следует, что скорость вращения генератора изменяется с течением времени по закону параболы.

Генератор снабжает электрической энергией потребителей до тех пор, пока его скорость вращения не станет равной $\omega_{\min}$. При минимальной скорости вращения сопротивление цепи возбуждения становится больше критического сопротивления и генератор развозбуждается. Следовательно, время работы генератора t_m определяется из уравнения

$$\omega_{\min} = K_{\omega} \omega_{\min} \sqrt{1 - \frac{t_m}{T_M K_{\omega}^2}}, \quad (2.18)$$

$$t_m = T_M (K_{\omega}^2 - 1). \quad (2.19)$$

Таким образом, время работы генератора зависит от электромеханической постоянной T_M и коэффициента кратности уменьшения скорости вращения K_{ω} .

В ряде случаев время полета объекта, на котором устанавливается генератор с инерционным приводом, больше, чем время работы такого генератора. Тогда приведение в действие генератора осуществляется комбинированным способом: с помощью инерционного привода и привода от ветрянки.

Наличие ветрянки увеличивает время, в течение которого скорость вращения генератора изменяется от $\omega_{\max}$ до $\omega_{\min}$.

Глава III

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ САМОЛЕТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 3.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

О магнитных свойствах электрических генераторов можно иметь наглядное представление по характеристикам холостого хода, представляющим собой зависимость э. д. с. от тока возбуждения $E=f(i_v)$ при постоянной скорости вращения $n=\text{const}$ и при сопротивлении внешней цепи $R=\infty$, т. е. при разомкнутой внешней цепи.

Кривая этой зависимости изображена на фиг. 3.1. При разомкнутой цепи возбуждения ($i_v=0$) в якоре генератора при вращении его со скоростью n наводится некоторая, хотя и весьма малая, э. д. с. за счет остаточного магнетизма. Однако ради простоты это обычно не учитывается и предполагается, что кривая начинается в начале координат.

Известно, что э. д. с., наводимая в обмотке якоря генератора, может быть вычислена по формуле

$$E = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} N \Phi_{\text{я}} \cdot 10^{-8} \text{ в}, \quad (3.1)$$

где p — число пар полюсов;
 a — число пар параллельных ветвей;

N — число активных проводников обмотки якоря;

$\Phi_{\text{я}}$ — магнитный поток якоря в максвеллах;

n — скорость вращения в об/мин.

Для каждой машины величина

$$\frac{p}{a} \cdot \frac{N}{60} 10^{-8} = c \quad (3.2)$$

Фиг. 3.1. Характеристики холостого хода самолетного генератора.

имеет постоянное значение, следовательно,

$$E = cn \Phi_{\text{я}}. \quad (3.3)$$

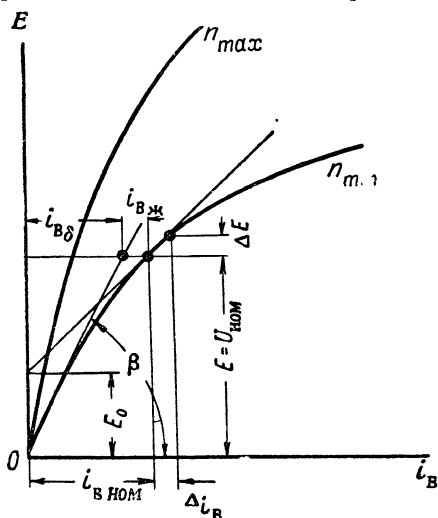
В первом приближении можно считать, что магнитное сопротивление (цепи якоря) машины находится в линейной зависимости от результирующей намагничивающей силы:

$$R_{\text{мг}} = a + bi_{\text{в.р.}} \quad (3.4)$$

Здесь $R_{\text{мг}}$ — магнитное сопротивление;

a и b — постоянные;

$i_{\text{в.р.}}$ — результирующий ток возбуждения.



Результирующий ток возбуждения представляет собой сумму токов, т. е. $i_{в.р} = i_{в} + i_0$; $i_{в}$ — ток в цепи возбуждения, а i_0 — ток, характеризующий намагничивающую силу, которая создает поток остаточного магнетизма.

Таким образом, в общем случае можно полагать, что

$$\Phi_{я} = \frac{i_{в.р}}{a + bi_{в.р}}, \quad (3.5)$$

и, следовательно,

$$E = c \frac{ni_{в.р}}{a + bi_{в.р}}. \quad (3.6)$$

Если через ординату, выражающую номинальное значение напряжения генератора $U_{ном}$, провести горизонталь, то точка пересечения ее с кривой характеристики холостого хода позволяет найти значение тока возбуждения $i_{в.ном}$, которое соответствует э. д. с., равной $U_{ном}$. Кроме того, по характеристике холостого хода можно составить представление о магнитных свойствах машины при данном токе возбуждения.

Действительно, характеристика холостого хода представляет собой (при $n = \text{const}$) не что иное, как кривую намагничивания машины, поэтому по кривым характеристики холостого хода можно судить о степени насыщения машины, которое соответствует номинальной или любой другой э. д. с. якоря, и определить так называемое относительное насыщение и коэффициент магнитного насыщения, характеризующие качественную и количественную стороны магнитных свойств электрических машин; по ним можно судить также об устойчивости самовозбуждения, о соотношении ампервитков воздушного зазора и ферромагнитной части магнитной системы машины и находить критическое сопротивление цепи возбуждения.

а) Относительное магнитное насыщение μ_0 при каком-либо возбуждении представляет собой отношение отрезка E_0 , отсекаемого на оси ординат касательной, проведенной в точке кривой холостого хода, соответствующей данному возбуждению, к ординате E того же возбуждения, т. е. $\mu_0 = \frac{E_0}{E}$. На фиг. 3.1 это построение сделано для возбуждения, при котором э. д. с. равна номинальному напряжению.

Значения относительного магнитного насыщения не зависят от масштаба кривых и выражают степень насыщения машины. Действительно, при совершенно ненасыщенном состоянии магнитной системы (для точек на начальной прямолинейной части кривой) он равен, как это легко понять, нулю и стремится к единице по мере увеличения насыщения.

б) Коэффициент магнитного насыщения $\mu_f = \frac{\Delta i_{в}}{i_{в.ном}} : \frac{\Delta E}{E_{ном}}$ равен отношению относительного изменения тока возбуждения к относительному изменению э. д. с., что видно из фиг. 3.1, и при отсутствии специальных указаний относится к возбуждению при номинальной скорости и номинальном напряжении. Из рассмотрения диаграммы на фиг. 3.1 легко установить, что между μ_0 и μ_f существует следующая связь:

$$\mu_0 = \left(1 - \frac{1}{\mu_f}\right) \text{ и } \mu_f = \frac{1}{1 - \mu_0}. \quad (3.7)$$

в) Соотношение намагничивающих ампервитков. Из характеристики холостого хода можно получить также представление об ампервитках, необходимых для проведения магнитного потока в же-

лезе и в воздушном зазоре. Действительно, вначале, когда насыщение весьма мало, можно считать, что все ампервитки идут на преодоление воздушного зазора (прямолинейная часть характеристики), а поэтому, если провести касательную к кривой характеристики в начале координат, точка пересечения ее с горизонталью, проведенной через любую точку характеристики, делит полные ампервитки возбуждения на ампервитки воздушного зазора AW_{δ} и железа $AW_{ж}$, как это изображено на фиг. 3.1, для точки $E=U_{ном}$.

г) Сопротивление воздушного зазора R_{δ} можно определить по характеристике холостого хода как

$$R_{\delta} = \frac{AW_{\delta}}{\Phi} = \frac{K_1 i_b}{K_2 E} = K_3 \frac{i_b}{E} = K_3 \operatorname{ctg} \beta. \quad (3.8)$$

При исследовании магнитных свойств генератора пользуются характеристикой холостого хода, снятой после предварительного размагничивания машины. В этом случае $\bar{i}_b = i_b$, $i_0 = 0$ и кривая $E = f(i_b)$ начинается в начале координат.

На фиг. 3.2 приведены характеристики холостого хода для генератора ГСР-18000.

Как видно из этих кривых, при увеличении тока возбуждения э. д. с. нарастает сначала почти по прямой линии до тех пор, пока магнитная система машины остается ненасыщенной, потом наклон подъема кривой характеристики постепенно уменьшается, и при наступлении полного насыщения магнитной системы дальнейшее нарастание э. д. с. вновь происходит почти по прямой линии, но наклоненной к оси абсцисс под гораздо меньшим углом, чем в начале кривой характеристики холостого хода.

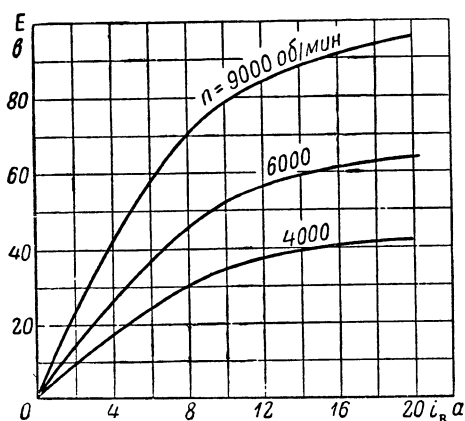
Для современных самолетных генераторов коэффициент магнитного насыщения μ_f находится в пределах 1,3—1,6, а μ_0 — 0,25—0,38.

Отношение $\frac{AW_{ж}}{AW_{\delta}}$ составляет величину порядка 0,1—0,2.

Для генераторов постоянного тока представляет также интерес знание внешней характеристики возбуждения, выражающей зависимость напряжения на зажимах генератора U от тока возбуждения i_b при постоянной скорости вращения $n = \text{const}$ и постоянной величине сопротивления во внешней цепи $R = \text{const}$.

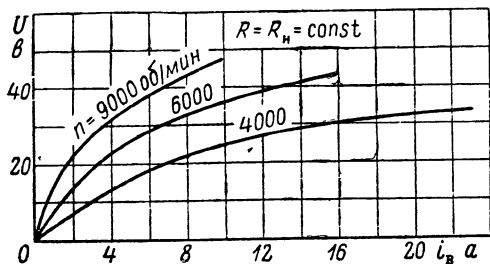
Семейство внешних характеристик возбуждения самолетного генератора ГСР-18000 приведено на фиг. 3.3. Как видно из этой фигуры, кривые внешней характеристики возбуждения для генераторов с параллельным возбуждением лежат ниже кривых холостого хода вследствие влияния реакции якоря и внутреннего сопротивления цепи якоря.

При исследованиях процессов регулирования напряжения генераторов в ряде случаев приходится иметь дело с нагрузочными характеристиками генераторов, представляющими собой зависимость напряжения генератора от тока возбуждения при постоянных значениях скорости вращения и тока нагрузки генератора. Частным случаем этих характери-

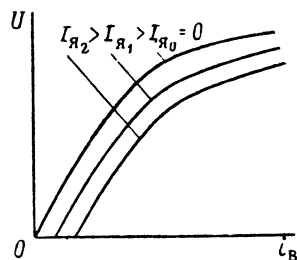


Фиг. 3.2. Характеристики холостого хода самолетного генератора ГСР-18000.

стик при нулевой нагрузке является характеристика холостого хода. На фиг. 3.4 изображено семейство нагрузочных характеристик самолетного генератора постоянного тока для различных нагрузок.



Фиг. 3.3. Внешние характеристики возбуждения самолетного генератора ГСР-18000 при номинальной нагрузке.



Фиг. 3.4. Нагрузочные характеристики самолетного генератора постоянного тока.

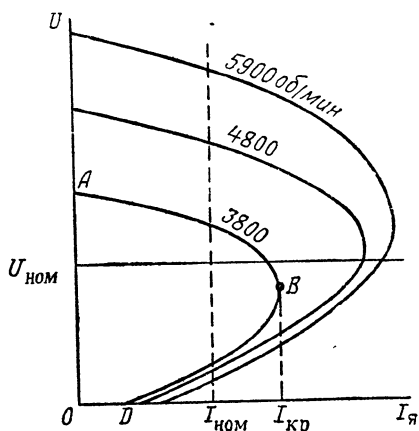
За счет реакции якоря и падения напряжения в цепи якоря эти характеристики располагаются тем ниже характеристики холостого хода, чем больше нагрузка генератора.

§ 3.2. ВНЕШНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для анализа вопросов, связанных с исследованием влияния нагрузки и параллельной работы генераторов, необходимо пользоваться внешними характеристиками генераторов, которые представляют собой зависимость напряжения на зажимах генератора от токов нагрузки (во внешней цепи), при условии что скорость вращения и сопротивление цепи возбуждения остаются постоянными. На фиг. 3.5 изображены внешние характеристики самолетного генератора с параллельным возбуждением для трех скоростей вращения.

Как известно, падение напряжения при увеличении нагрузки генератора с параллельным возбуждением происходит по трем причинам: из-за падения напряжения в якорной обмотке и в щеточном контакте, реакции якоря и уменьшения тока (соответственно потока) возбуждения, являющегося следствием понижения напряжения на зажимах генератора.

Величина критического тока $I_{кр}$, т. е. максимального тока, который может быть получен от генератора при данной скорости вращения и при данном сопротивлении цепи возбуждения, зависит от ряда факторов: от насыщения, положения щеток, коммутации, температуры отдельных частей машины. Коммутация оказывает заметное влияние на величину критического тока: при сильном искрении под щетками падение напряжения в щеточном контакте резко увеличивается, что, учитывая его относительно большую величину в самолетных генераторах, приводит к уменьшению критического тока.

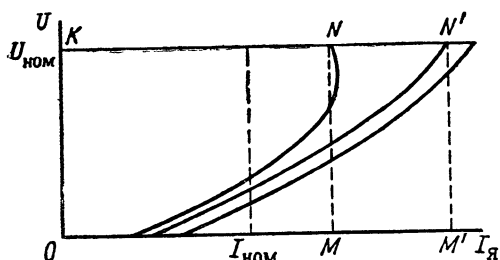


Фиг. 3.5. Внешние характеристики самолетного генератора с параллельным возбуждением, работающего без регулятора напряжения.

Температура также значительно влияет на величину критического тока: в нагретой машине падение напряжения увеличивается за счет повышения сопротивления как цепи якоря, так и цепи возбуждения и поэтому критический ток уменьшается.

Внешняя характеристика, кроме того, зависит еще от скорости вращения. С увеличением скорости вращения при неизменном сопротивлении цепи возбуждения внешняя характеристика на участке AB располагается выше, так как в генераторе при большой скорости индуцируется большая э. д. с. Величина критического тока с увеличением скорости вращения возрастает.

Однако необходимо иметь в виду, что самолетные генераторы, как правило, работают с автоматическими регуляторами напряжения. Внешняя характеристика генератора, снабженного регулятором напряжения,



Фиг. 3.6. Внешние характеристики самолётного генератора с параллельным возбуждением, работающего с регулятором напряжения.

отличается от приведенной выше. Регулятор напряжения начиная с холостого хода и до некоторой нагрузки (выше номинальной) поддерживает напряжение практически неизменным. По мере увеличения нагрузки для поддержания напряжения постоянным необходимо компенсировать снижение напряжения увеличением тока возбуждения. Эту функцию выполняет автоматический регулятор напряжения, уменьшающий сопротивление в цепи возбуждения по мере роста нагрузки. При некото-

ром токе нагрузки (ток OM , фиг. 3.6), когда регулятор уменьшит сопротивление цепи возбуждения до возможного минимального значения и свое действие прекратит, напряжение от точки N в зависимости от тока нагрузки будет изменяться по внешней характеристике при $R_b = R_{b\min}$, т. е. уменьшаться с возрастанием нагрузки.

Для генераторов, работающих с регулятором напряжения, характерной величиной, определяемой из внешних характеристик, является величина предельного тока $I_{\text{пред}}$ (ток OM , фиг. 3.6), т. е. величина максимального тока, который еще можно получить от генератора при номинальном напряжении и заданной скорости вращения. Предельный ток также увеличивается с возрастанием скорости вращения.

Перегрузочная способность генератора определяется величиной предельного тока.

В нормальных типах генераторов при минимально допустимых скоростях вращения в среднем можно принять

$$I_{\text{пред}} \approx 1,8 I_{\text{ном}}; \quad I_{\text{крит}} = 2,0 I_{\text{ном}}. \quad (3.9)$$

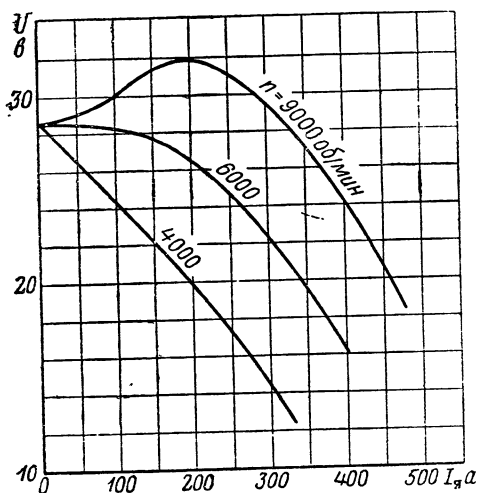
В самолетных генераторах повышенной мощности (начиная от 6 кВт) величины критического и предельного токов могут быть увеличены за счет применения компенсационной обмотки, компенсирующей действие реакции якоря.

Благодаря увеличению предельного и критического токов самолётного генератора увеличивается и наибольшая мощность генератора, которая кратковременно может быть от него получена.

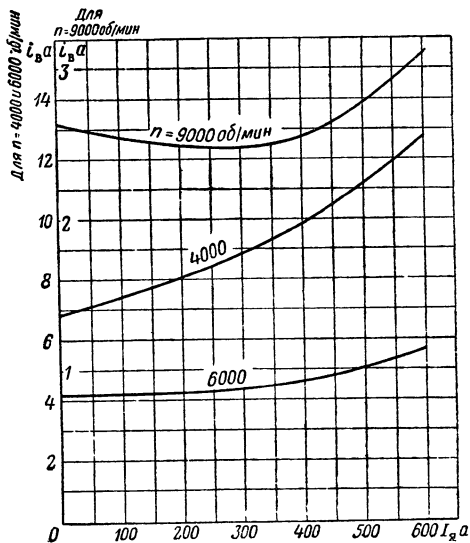
У компенсированного генератора по сравнению с некомпенсированным, рассчитанным на ту же номинальную мощность, предельный и критический токи возрастают примерно на 25 %.

Величины предельного и критического токов зависят также от сопротивления цепи возбуждения: чем больше сопротивление цепи возбуждения, тем меньше ток возбуждения, и, следовательно, при неизменной скорости вращения тем меньше значения предельного и критического токов.

Влияние температуры на предельный критический ток проявляется, таким образом, не только за счет изменения сопротивления якорной обмотки, но и за счет изменения сопротивления обмотки возбуждения. При повышении температуры увеличивается сопротивление обмотки воз-



Фиг. 3.7а. Внешние характеристики само-летного генератора ГСР-18000 с параллельным возбуждением и с дополнительными полюсами.



Фиг. 3.7б. Регулировочные характеристики генератора ГСР-18000.

буждения и, следовательно, уменьшается перегрузочная способность генератора.

Все приведенные рассуждения справедливы для установившегося режима, т. е. когда после изменения сопротивления внешней цепи ток успевает достичь своего стационарного значения.

При наличии дополнительных полюсов возникают продольные поля от токов, протекающих в витках обмотки якоря, находящихся в зоне коммутации. В некоторых генераторах эти поля могут вызывать компаундирующее действие, и тогда, если возбудить машину так, чтобы напряжение при холостом ходе было равно номинальному, то при увеличении нагрузки от нуля до некоторой предельной величины может иметь место не снижение, а, наоборот, повышение напряжения, и только после перехода за эту нагрузку наступает непрерывное снижение напряжения.

Сказанное иллюстрируется кривыми, снятыми для генератора ГСР-18000 и изображенными на фиг. 3.7а. Как видно из этих кривых, компаундирующий эффект наступает лишь при определенных повышенных скоростях вращения.

Регулировочные характеристики для работы генератора при таких повышенных скоростях имеют вид, изображенный на фиг. 3.7б.

§ 3.3. УСЛОВИЯ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ

Электродвижущая сила, наводящаяся в якоре генератора постоянного тока при вращении его со скоростью n , равна

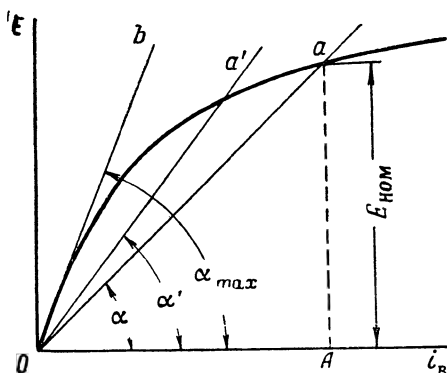
$$E = cn\Phi_{\text{я}}. \quad (3.10)$$

Величина c для данного генератора имеет постоянное значение и определяется конструктивными параметрами машины. Переменными же величинами, характеризующими процесс наведения э. д. с., могут быть только скорость вращения его и магнитный поток в якоре $\Phi_{\text{я}}$.

Таким образом, $E \equiv n\Phi_{\text{я}}$. Отсюда следует, что для наведения э. д. с. необходимо вращение якоря и наличие магнитного потока. Поэтому для обеспечения начала процесса самовозбуждения необходимо, чтобы магнитная система генератора обладала остаточным магнетизмом; с этой

целью, в частности, корпус генератора и делается из стали, с относительно большой коэрцитивной силой, если полюсы изготовлены из электро-технической стали, коэрцитивная сила которых очень мала.

Кроме того, необходимым условием для усиления магнитного потока в процессе самовозбуждения является необходимость совпадения направления поля остаточного магнетизма и поля, создаваемого током в обмотке возбуждения, вследствие наведения э. д. с. от остаточного магнетизма, т. е. чтобы поле, создаваемое током возбуждения, усиливало поле остаточного магнетизма, а не ослабляло его, т. е. не размагничивало генератор.



Фиг. 3.8. Характеристика холостого хода и критическое сопротивление цепи возбуждения.

Чтобы обеспечить самовозбуждение электрического генератора, необходимо, чтобы сопротивление цепи возбуждения его было меньше так называемого критического сопротивления.

Необходимость соблюдения последнего условия легко понять из рассмотрения характеристик холостого хода (фиг. 3.8).

Если через точку a , соответствующую э. д. с. при данном токе возбуждения $i_b = OA$, провести луч Oa , то тангенс угла наклона $\operatorname{tg} \alpha$ этой прямой изображает в некотором масштабе сопротивление цепи возбуждения:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{E}{i_b} = \frac{aA}{OA} = R_b. \quad (3.11)$$

Процесс самовозбуждения генератора (см. фиг. 3.8) описывается следующим уравнением:

$$i_b R_b + w \frac{d\Phi_b}{dt} = E. \quad (3.12)$$

Отсюда

$$w \frac{d\Phi_b}{dt} = E - i_b R_b. \quad (3.13)$$

Очевидно, самовозбуждение будет происходить тогда, когда $\frac{d\Phi_b}{dt} > 0$, т. е. когда ординаты характеристики холостого хода больше соответ-

ствующих ординат прямой Oa для одних и тех же значений тока i_B , иначе говоря, когда э. д. с. генератора E больше омического падения напряжения в цепи возбуждения $i_B R_B$.

Процесс возбуждения будет продолжаться до тех пор, пока избыточное напряжение

$$\Delta E = E - i_B R_B, \quad (3.14)$$

усиливающее ток возбуждения, не делается равным нулю. Такое состояние теоретически наступает при $t = \infty$; тогда э. д. с. $E = E_{\text{ном}}$ и $E_{\text{ном}} - i_B R_B = 0$.

В зависимости от того, какое сопротивление включено в цепь возбуждения машины, процесс возбуждения заканчивается при большем или меньшем значении $E_{\text{ном}}$.

Из фиг. 3.8 видно, что лучи с большим углом наклона к оси абсцисс, например, луч Oa' , пересекают характеристику в точках, имеющих меньшие ординаты. Отсюда следует, что при больших сопротивлениях ($R'_B = K \operatorname{tg} \alpha'$) самовозбуждение машины заканчивается при меньших $E < E_{\text{ном}}$; при сопротивлении $R_{B, \text{крит}} = K \operatorname{tg} \alpha_{\text{нах}}$ самовозбуждение генератора становится весьма неустойчивым, а при $R_B > K \operatorname{tg} \alpha_{\text{нах}}$ даже невозможным.

Каждой скорости вращения генератора соответствует определенное критическое сопротивление. Легко понять, что чем больше скорость вращения генератора, тем больше критическое сопротивление цепи возбуждения.

Условие самовозбуждения генератора можно также найти аналитически, если предположить (как и в § 3.1), что магнитное сопротивление цепи якоря находится в линейной зависимости от намагничивающей силы:

$$R_M = a + bi_B. \quad (3.15)$$

В этом случае характеристика намагничивания машины выражается уравнением гиперболы:

$$\Phi_Y = \frac{i_B}{a + bi_B}. \quad (3.16)$$

Э. д. с., наводимая в якоре машины, тогда может быть представлена следующим образом:

$$E = c \cdot n \frac{i_B}{a + bi_B}. \quad (3.17)$$

Пренебрегая падением напряжения в обмотке якоря $i_B r_Y$, ток i_B в цепи возбуждения можно выразить следующим образом:

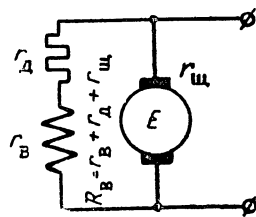
$$i_B = \frac{E}{R_B}. \quad (3.18)$$

Подставляя выражение (3.18) в (3.17), находят

$$E = cn \frac{\frac{E}{R_B}}{a + b \frac{E}{R_B}}. \quad (3.19)$$

На основании выражения (3.19) получается следующее выражение для E :

$$E = \frac{c \cdot n - a R_B}{b}. \quad (3.20)$$



Фиг. 3.9. Схема генератора с параллельным возбуждением.

Из последнего выражения видно, что $E > 0$ только в том случае, если $c \cdot n > a R_B$ или

$$R_B < \frac{c \cdot n}{a} = R_{B, \text{крит}}. \quad (3.21)$$

Следовательно, критическое значение сопротивления цепи возбуждения прямо пропорционально скорости вращения генератора.

Минимальное значение сопротивления цепи возбуждения равно

$$R_{B \min} = r_B + r_{щ},$$

где r_B — сопротивление обмотки возбуждения;

$r_{щ}$ — переходное сопротивление щеток.

По величине $R_{B \min}$ можно найти так называемую «мертвую» скорость вращения генератора, т. е. такую скорость вращения, при которой и ниже которой самовозбуждение генератора невозможно:

$$n_{\text{мертв}} = \frac{a}{c} R_{B \min}. \quad (3.22)$$

Если известно сопротивление в цепи возбуждения и критическое сопротивление $R_{B \text{крит}}$ для данной скорости вращения n_1 , то «мертвая» скорость вращения (фиг. 3.10) легко находится по формуле

$$n_{\text{мертв}} = n_1 \frac{R_{B1}}{R_{B, \text{крит}}} = n_1 \frac{b\delta}{a\delta}. \quad (3.23)$$

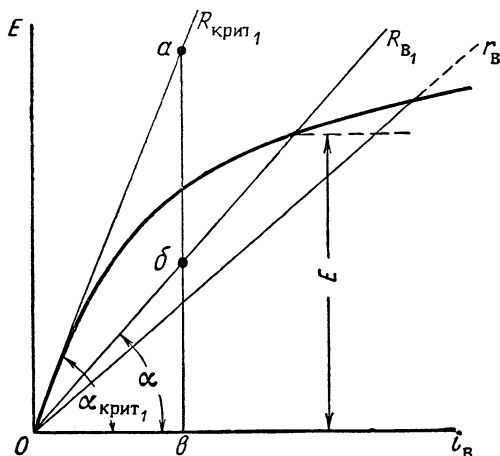
§ 3.4. РЕОСТАТНЫЕ СКОРОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Самолетные генераторы, приводимые во вращение от авиационного двигателя, должны работать с постоянным напряжением при скоростях вращения, изменяющихся в довольно широком диапазоне.

При исследовании процесса регулирования напряжения и расчета регуляторов напряжения необходимо знать закон, согласно которому следует регулировать сопротивление цепи возбуждения генератора для того, чтобы поддерживать напряжение на зажимах его постоянным при различных скоростях вращения. Обычно зависимость сопротивления цепи возбуждения генератора от скорости вращения последнего, при условии что напряжение на зажимах генератора поддерживается постоянным, или так называемая реостатная характеристика находится или чисто опытным путем или косвенным образом на основании характеристик возбуждения, снятых для различных скоростей вращения.

Каждому току возбуждения, независимо от скорости вращения якоря, соответствует строго определенное значение магнитного потока Φ . Э. д. с. пропорциональна магнитному потоку и скорости вращения, следовательно, при изменении n в γ раз во столько же раз изменится и E , т. е.

$$E_2 = E_1 \frac{n_2}{n_1} = E_1 \gamma. \quad (3.24)$$

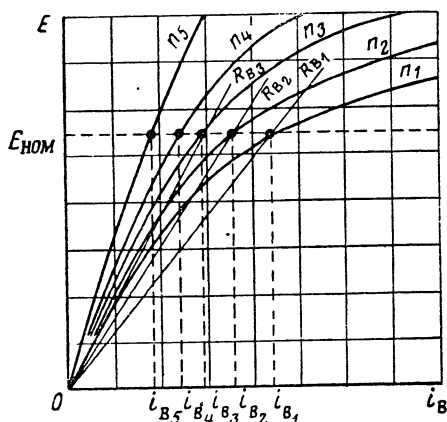


Фиг. 3.10. Определение «мертвой» скорости вращения генератора.

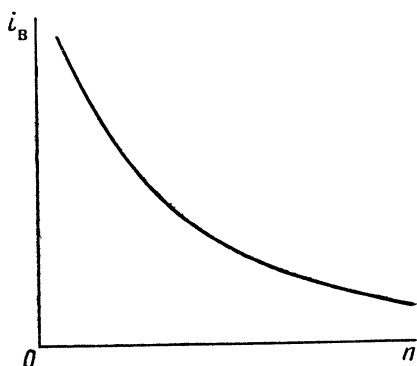
Отсюда следует, что ординаты кривой холостого хода при $n_2 = \text{const}$ могут быть получены путем умножения на ν соответствующих ординат характеристики холостого хода при $n_1 = \text{const}$.

На фиг. 3.11 изображено семейство характеристик холостого хода для различных постоянных скоростей вращения $n_1 < n_2 < n_3 < n_4 < n_5$. Пусть необходимо поддерживать постоянной э. д. с. $E_{n \text{ ном}}$, тогда, проводя соответствующую горизонталь, легко найти значения токов возбуждения i_{B1} , i_{B2} , i_{B3} и i_{B4} , необходимые для получения $E_{n \text{ ном}}$ при любой скорости вращения. Ясно, что чем больше n , тем меньший ток возбуждения i_B требуется для поддержания $E_{n \text{ ном}} = \text{const}$.

Из формулы $E = c n \Phi_a$ следует, что зависимость Φ_a от n при постоянной E представляет собой гиперболу, однако для практики больший интерес представляет зависимость $i_B = f(n)$ при $E = \text{const}$.



Фиг. 3.11. Семейство характеристик холостого хода для различных скоростей вращения.



Фиг. 3.12. Регулировочная характеристика.

Эту зависимость легко построить (фиг. 3.12) по данным, полученным на фиг. 3.11. Называется она регулировочной характеристикой, или характеристикой регулирования тока возбуждения.

Изменения тока возбуждения добиваются при помощи изменения сопротивления реостата r_d регулятора поля, включенного последовательно в цепь обмотки возбуждения, в результате чего изменяется суммарное сопротивление цепи возбуждения.

Для нахождения значений R_B , необходимых для поддержания $E_n = E_{\text{ном}} = \text{const}$ при различных n , проводят лучи сопротивлений R_{B1} , R_{B2} через точки характеристик, соответствующие значениям $E_{n \text{ ном}}$ (см. фиг. 3.11), и измеряют тангенсы углов наклона этих лучей или, что проще, подсчитывают по формулам:

$$R_{B1} = \frac{E_{\text{ном}}}{i_{B1}}; R_{B2} = \frac{E_{\text{ном}}}{i_{B2}}; R_{B3} = \frac{E_{\text{ном}}}{i_{B3}} \text{ и т. д.}$$

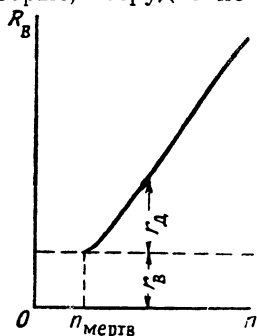
Полученные результаты можно изобразить в виде кривой (фиг. 3.13), изображающей зависимость $R_B = f(n)$ при $E_n = E_{\text{ном}} = \text{const}$, называемую реостатной регулировочной характеристикой. Из фиг. 3.13 следует, что R_B растет с увеличением n , поэтому само собой понятно, что должна существовать некоторая предельная минимальная скорость вращения якоря, при которой еще возможно возбуждение машины за счет выключения сопротивления регулятора поля. В этом случае $R_B = r_B$, а предельная минимальная скорость вращения называется «мертвой

скоростью» вращения ($n_{\text{мертв}}$ на фиг. 3.13). Проведя горизонталь через ординату кривой, соответствующую «мертвой скорости вращения», легко видеть, что отрезки ординат между кривой и горизонталью с ординатой r_b представляют значения r_d для соответствующих скоростей вращения.

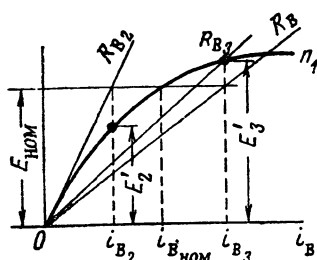
Для построения всех упомянутых выше характеристик нет необходимости в построении всего семейства кривых холостого хода, а все они могут быть получены по одной характеристике холостого хода, например, для $n_1 = \text{const}$ (фиг. 3.14). Для того чтобы найти значение тока возбуждения i_{B2} , необходимого для поддержания $E_n = E_{\text{ном}} = \text{const}$ при новой скорости вращения n_2 , можно предположить сначала, что оно известно. Тогда при этом токе возбуждения, но при скорости вращения n_2 , будет наводиться э. д. с.

$$E'_2 = E_{\text{ном}} \frac{n_1}{n_2} = \frac{E_{\text{ном}}}{\nu}. \quad (3.25)$$

Аналогичным образом могут быть найдены значения E'_3 , E'_4 и т. д., зная которые, нетрудно по кривой холостого хода при $n_1 = \text{const}$ найти



Фиг. 3.13. Реостатная регулировочная характеристика.



Фиг. 3.14. Построение регулировочной характеристики по характеристике холостого хода.

соответствующие им значения токов возбуждения i_{B2} , i_{B3} , а затем подсчитать и значения R_b по формулам $R_{B2} = \frac{E_{\text{ном}}}{i_{B2}}$ и т. д. Имея же все эти данные, легко построить регулировочные характеристики.

Однако при расчете регуляторов возбуждения желательно иметь не только опытные кривые реостатных скоростных характеристик, но и формулы, посредством которых можно было бы с достаточным для практических целей приближением аппроксимировать указанную выше характеристику. Ниже приводятся выводы, на основании которых получены сравнительно простые формулы, устанавливающие связь между добавочным сопротивлением цепи возбуждения генератора и его скоростью вращения, при условии что э. д. с. генератора должна оставаться постоянной.

Как уже было указано, магнитную характеристику электрических машин постоянного тока можно с достаточной точностью выразить формулой

$$\Phi_{\text{я}} = \frac{i_B}{a + bi_B}. \quad (3.26)$$

Если обе части равенства (3.26) помножить на cn , то, приняв во внимание, что $cn\Phi_{\text{я}}$ представляет электродвижущую силу E_0 , наводимую в обмотке якоря при вращении генератора вхолостую, получают

$$cn\Phi_{\text{я}} = E_0 = \frac{cni_B}{a + bi_B}. \quad (3.27)$$

Но при холостом ходе для случая параллельного возбуждения генератора $\frac{E_0}{i_b} = R_{в0}$ — сопротивлению цепи возбуждения; таким образом, согласно выражению (3.27)

$$R_{в0} = \frac{c \cdot n}{a + b i_b} = \frac{c \cdot n}{a + b \frac{E_0}{R_{в0}}} \quad (3.28)$$

Отсюда следует

$$a R_{в0} + b E_0 = c n \quad (3.29)$$

или

$$R_{в0} = \frac{c n - b E_0}{a} \quad (3.30)$$

Если ставится требование, чтобы при самой минимальной скорости вращения $n_{\min}$ э. д. с. генератора была равна E_0' , то сопротивление цепи возбуждения должно быть доведено до наименьшей величины; в этом случае добавочное сопротивление r_d должно быть равно нулю. Таким образом, $R_{в0}$ при $n_{\min}$ получается равным сопротивлению лишь одной обмотки возбуждения r_b . При $R_{в0} = r_b$ на основании формулы (3.30) следует:

$$r_b = \frac{c n_{\min} - b E_0'}{a} \quad (3.31)$$

Вычитая выражение (3.31) из (3.30), имеем

$$r_d = R_{в0} - r_b = \frac{c(n - n_{\min}) - b(E_0 - E_0')}{a} \quad (3.32)$$

Эта формула дает возможность вычислить значение добавочного сопротивления r_d , которое необходимо ввести в цепь возбуждения с тем, чтобы э. д. с. генератора при скорости вращения $n > n_{\min}$ была равна заданному значению.

При условии $E_0 = E_0' = \text{const}$ добавочное сопротивление должно быть равно

$$r_d = \frac{c(n - n_{\min})}{a} = \frac{c \Delta n}{a} \quad (3.33)$$

Последняя формула показывает, что для поддержания постоянной э. д. с. при холостом ходе генератора необходимо добавочное сопротивление в цепи возбуждения изменять в линейной зависимости от скорости вращения, если кривая намагничивания аппроксимируется ветвью гиперболы.

Для случая, когда генератор имеет постоянную нагрузку, вращается с различными скоростями, а напряжение на зажимах его должно поддерживаться постоянным, аналитическая зависимость добавочного сопротивления r_d от скорости вращения n может быть найдена следующим образом.

Вначале устанавливают связь между током возбуждения и потоком якоря при действии реакции якоря, которая получается при прохождении заданного тока нагрузки по обмотке якоря, и аппроксимируют эту функцию ветвью гиперболы. Пусть в этом случае $\Phi_a = f(i_a)$ представляется так:

$$\Phi_a = \frac{i_b}{a_n + b_n i_b} \quad (3.34)$$

Умножая обе части этого равенства на cn , получают

$$E = \frac{cni_B}{a_n + b_n i_B}. \quad (3.35)$$

При нагрузке генератора

$$E = U + I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \quad (3.36)$$

где U — напряжение на зажимах генератора;

$I_{\text{я}}$ — ток в цепи якоря при нагрузке;

$R_{\text{я}}$ — сопротивление цепи якоря.

Сопротивление цепи возбуждения шунтового генератора равняется

$$R_B = \frac{U}{i_B} = \frac{E - I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{i_B}. \quad (3.37)$$

Пользуясь формулами (3.35) и (3.37), находят

$$R_B = \frac{(cn - b_n E) U}{a_n E}. \quad (3.38)$$

Полагая $U = \text{const}$ и, следовательно, $E = U + I_{\text{я}} R_{\text{я}} = \text{const}$, получают

$$r_{\Delta n} = \frac{c(n - n_{\min}) U}{a_n E} = \frac{c \Delta n}{a_n (1 + \alpha)}, \quad (3.39)$$

где

$$1 + \alpha = \frac{E}{U}; \quad (3.40)$$

$$\Delta n = n - n_{\min}. \quad (3.41)$$

Выведенная формула (3.39) показывает, что и в случае нагруженного генератора реостатная скоростная характеристика представляется в виде прямой линии.

Минимальная скорость вращения, при которой нагруженный генератор может иметь заданное напряжение на зажимах, легко определяется на основании формулы (3.38), если принять во внимание, что для этого случая $R_B = r_B$. Минимальная скорость вращения $n_{\min}$ получается равной

$$n_{\min} = \frac{r_B a_n}{c} \frac{E}{U} + \frac{b_n E}{c} = r_B \frac{a_n}{c} (1 + \alpha) + \frac{b_n}{c} U (1 + \alpha) = \frac{1 + \alpha}{c} [r_B a_n + b_n U]. \quad (3.42)$$

Так как при нагрузке $(1 + \alpha) > 1$ и величина $r_B a_n + b_n U$ получается всегда больше, чем $r_B a_n + b_n E_0$ для одного и того же тока возбуждения (так как внешние характеристики возбуждения располагаются ниже характеристики холостого хода), то при U , равном по величине E_0 , минимальная скорость вращения нагруженного генератора, как это наглядно показывает формула (3.42), всегда больше таковой при холостом ходе.

К аналогичным выводам можно прийти и в отношении максимумов скоростей вращения, если в формулу (3.42) вместо r_B подставить $R_{B \text{ max}} = r_B + r_{\Delta \text{ max}}$.

§ 3.5. СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ВОЗБУЖДЕНИЯ И КРИТЕРИЙ СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ГЕНЕРАТОРА С САМОВОЗБУЖДЕНИЕМ

К генераторам постоянного тока предъявляется требование, чтобы напряжение на зажимах их могло приходить в состояние равновесия после того, как параметры внешней цепи сделались постоянными, и чтобы состояние равновесия было устойчивым.

Условием, необходимым и достаточным для равновесия механической системы, является равенство нулю суммы всех элементарных работ, действующих на систему сил при виртуальных перемещениях:

$$X_1 \delta x_1 + X_2 \delta x_2 + \dots + X_n \delta x_n = \delta A = 0, \quad (3.43)$$

где X_1 — обобщенные силы, действующие на систему;

δx_1 — обобщенные виртуальные перемещения.

Равновесие системы устойчиво тогда, когда при нарушении равновесия возникают силы, вызывающие стремление δA к нулю ($\delta A \rightarrow 0$), что возможно лишь в том случае, если при нарушении равновесия приращение элементарной работы δA на виртуальных перемещениях меньше нуля, т. е.

$$\delta^2 A < 0. \quad (3.44)$$

Эти положения можно распространить и на условия устойчивости электрической системы. При этом при исследовании статической устойчивости возбуждения генератора с самовозбуждением за обобщенные силы принимаются напряжения, действующие в системе, а за обобщенные перемещения — изменения тока в цепи возбуждения генератора.

Тогда

$$U di_b - i_b R_b di_b = dP, \quad (3.45)$$

так как

$$\delta i_b = di_b,$$

где U — напряжение на зажимах генератора;

i_b — ток возбуждения;

R_b — сопротивление в цепи возбуждения;

P — избыточная мощность в цепи возбуждения, или

$$U - i_b R_b = \frac{dP}{di_b}.$$

Для того чтобы система находилась в состоянии устойчивого равновесия, необходимо соблюдение условия

$$\frac{d^2 P}{di_b^2} < 0,$$

т. е.

$$\frac{dU}{di_b} - R_b < 0$$

или

$$R_b > \frac{dU}{di_b}. \quad (3.46)$$

Последнее неравенство и является условием устойчивости возбуждения генератора, а отношение $R_b : \frac{dU}{di_b}$ характеризует степень устойчивости.

Таким образом, степень устойчивости возбуждения системы при заданном напряжении U_1 на характеристике возбуждения машины определяется отношением тангенсов углов наклона двух прямых, проходящих через точку, соответствующую напряжению U_1 (фиг. 3.15): прямой, проведенной через начало координат и данную точку (тангенс угла наклона этой прямой определяется величиной сопротивления цепи возбуждения), и касательной к этой точке, тангенс угла наклона которой характеризует магнитное состояние машины.

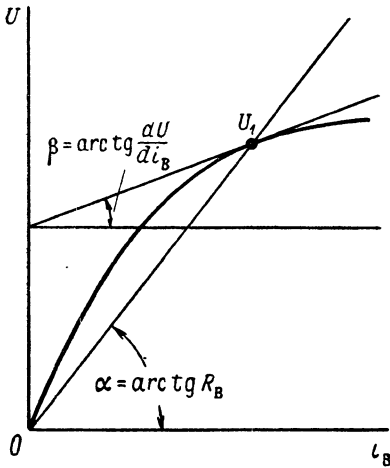
Величину

$$S_B = \frac{R_B}{\frac{dU}{di_B}} - 1 \quad (3.47)$$

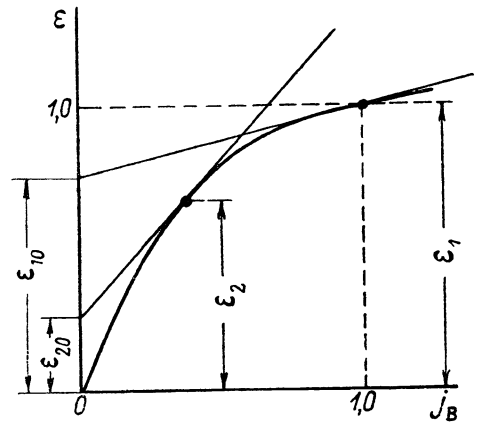
принято называть коэффициентом статической устойчивости возбуждения. Эту величину можно выразить так:

$$S_B = \frac{U}{i_B} \frac{di_B}{dU} - 1 = \left(\frac{di_B}{i_B} : \frac{dU}{U} - 1 \right). \quad (3.48)$$

Очевидно, что если $S_B > 0$, то самовозбуждение генератора статически устойчиво; если $S_B < 0$, то самовозбуждение генератора статически неустойчиво.



Фиг. 3.15. Определение коэффициента статической устойчивости возбуждения.



Фиг. 3.16. Определение коэффициента статической устойчивости в относительных единицах.

Как выше было указано, величина

$$\frac{di_B}{i_B} : \frac{dU}{U} \quad (3.49)$$

представляет собой коэффициент магнитного насыщения μ_f , связь которого с относительным насыщением магнитной системы μ_0 определяется соотношением $\mu_0 = \left(1 - \frac{1}{\mu_f}\right)$. Тогда

$$S_B = \mu_f - 1 = \frac{\mu_0}{1 - \mu_0}. \quad (3.50)$$

С уменьшением тока возбуждения машины насыщение ее уменьшаются и μ_0 приближается к нулю (фиг. 3.16), так как

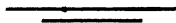
$$\mu_{01} = \frac{\epsilon_{10}}{\epsilon_1} > \mu_{20} = \frac{\epsilon_{20}}{\epsilon_2}.$$

Таким образом, и коэффициент статической устойчивости на ненасыщенной части кривой намагничивания также равен нулю.

Так как при заданной величине напряжения на зажимах генератора с увеличением скорости вращения ток возбуждения необходимо уменьшать, то с повышением скорости вращения генератора коэффициент статической устойчивости возбуждения генератора уменьшается.

Для достаточной устойчивости возбуждения при самых неблагоприятных условиях приходится в ряде случаев прибегать к специальным мерам по повышению статической устойчивости возбуждения самолетных генераторов, как, например:

- а) применение независимого возбуждения;
- б) введение в магнитную цепь материалов с повышенной коэрцитивной силой;
- в) искусственное повышение магнитного насыщения отдельных участков магнитной цепи.



Глава IV

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ САМОЛЕТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 4.1. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для нормальной работы потребителей электрической энергии на самолете необходимо, чтобы напряжение на зажимах генератора было постоянным при любых режимах его работы, возможных в процессе эксплуатации. Таким образом, возникает проблема регулирования напряжения.

Специфические особенности условий, в которых находятся и работают на самолете электрические генераторы и их автоматические регуляторы, оказывают существенное влияние на характер процессов самого регулирования напряжения. Наиболее существенными из этих особенностей с точки зрения регулирования напряжения самолетных генераторов являются:

1. Самолетный генератор приводится во вращение от авиадвигателя или турбокомпрессора, скорость вращения которых при изменении режима работы и высоты полета меняется в широких пределах (от 1 : 2 до 1 : 4). Это вызывает необходимость использования таких регуляторов и таких схем включения их, которые обеспечивали бы поддержание постоянного напряжения генератора в широких диапазонах изменения нагрузки и скорости вращения.

2. Неравномерность хода авиационного двигателя приводит к тому, что все оборудование самолета подвержено сотрясениям и вибрациям. В результате этого автоматический регулятор, также подверженный механическим вибрациям, в ряде случаев может не обеспечить удовлетворительного протекания процесса регулирования. Следует отметить, что иногда наличие механических вибраций регулятора может быть и полезным, так как при этом в меньшей мере сказываются вредное влияние сухого трения и наличие люфтов и зазоров в отдельных элементах регулятора.

3. Окружающие условия, в которых работают самолетные регуляторы (температура, давление и влажность воздуха), меняются в очень широких пределах.

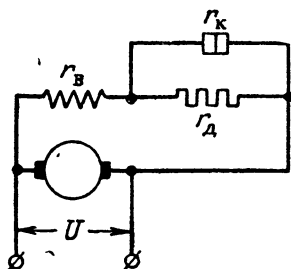
Приведенные особенности работы автоматических регуляторов на самолете необходимо учитывать при проектировании, выборе параметров и эксплуатации этих регуляторов.

Постоянство напряжения в генераторах постоянного тока обычно поддерживается путем изменения тока возбуждения машины в зависимости от режима ее работы. Для изменения же тока возбуждения в свою очередь надо воздействовать на какой-то другой параметр, изменением которого достигается необходимое значение тока возбуждения.

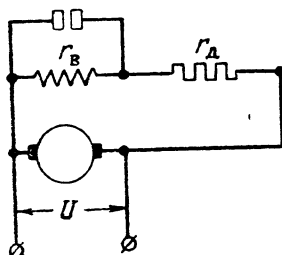
Для изменения тока возбуждения i_b самолетных генераторов применяются следующие способы управления:

1) Реостатный способ. В этом случае для регулирования тока возбуждения в цепь возбуждения вводится реостат, сопротивление которого можно изменять плавно или ступенями.

2) Импульсный, или вибрационный, способ. При этом способе используется периодическое кратковременное изменение параметров цепи возбуждения, вследствие чего ток в цепи возбуждения приобретает пульсирующий характер. Практически это достигается тем, что в цепь возбуждения вводится добавочное сопротивление, а параллельно ему или обмотке возбуждения включаются контакты; эти контакты посредством специальных устройств приводятся в состояние вибрации и, следовательно, принудительным образом замыкаются и размыкаются с определенной частотой. Для регулирования напряжения это устройство



Фиг. 4. 1. Схема присоединения вибрирующих контактов регулятора напряжения параллельно добавочному сопротивлению.



Фиг. 4. 2. Схема присоединения вибрирующих контактов регулятора напряжения параллельно обмотке возбуждения.

должно позволять изменять соотношение между временами замкнутого и разомкнутого состояний контактов.

Следует различать два основных способа включения контактов. Первый из них изображен на фиг. 4. 1, где контакты шунтируют добавочное сопротивление r_d , включенное последовательно с обмоткой возбуждения. При втором способе, изображенном на фиг. 4. 2, контакты включаются параллельно обмотке возбуждения.

При включении контактов по первому способу при длительном замыкании их установившийся ток возбуждения определяется сопротивлением цепи возбуждения $R_b = r_b$, а при длительном размыкании их — сопротивлением $R_b = r_b + r_d$. При вибрации контактов, когда непрерывно следуют друг за другом замыкания и размыкания контактов, ток возбуждения не успевает достигать установившихся значений, соответствующих только что упомянутым выше предельным значениям сопротивлений цепи возбуждения, а пульсирует около некоторого среднего значения.

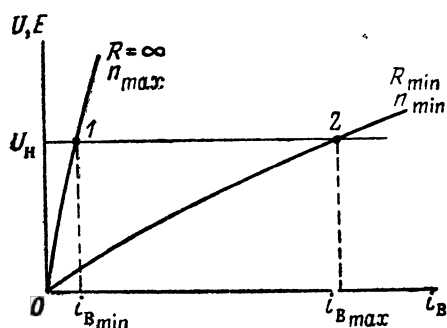
Для определения этого среднего значения можно реальный периодический процесс изменения тока возбуждения условно заменить фиктивным стационарным состоянием, при котором установившееся значение тока возбуждения, равное искомому среднему значению, определяется так называемым эффективным сопротивлением цепи возбуждения, величина которого зависит от соотношения времен замкнутого и разомкнутого состояний контактов.

Аналогичная картина получается и для случая включения контактов по схеме фиг. 4. 2, только здесь при разомкнутом состоянии $R_b = r_b + r_d$,

а при замкнутом состоянии контактов, когда их переходное сопротивление весьма мало, сопротивление цепи возбуждения можно условно принять $R_{\text{в}} \approx 0$, поскольку в этом случае ток в обмотке возбуждения $i_{\text{в}} \approx 0$. Для увеличения пределов регулирования тока возбуждения применяется и ряд других схем, принцип действия которых основан по существу на принципе действия реостатного или вибрационного регуляторов тока возбуждения.

§ 4.2. КРАТНОСТЬ РЕГУЛИРОВКИ ТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ

Диапазон изменения тока возбуждения генератора, необходимый для поддержания постоянства напряжения $U_{\text{н}}$ на его зажимах при всех возможных в эксплуатации режимах работы, ограничивается предельными режимами работы генератора, которым соответствуют значения максимального $i_{\text{в max}}$ и минимального $i_{\text{в min}}$ токов возбуждения. Отношение этих токов обычно называется кратностью регулировки тока возбуждения



Фиг. 4.3. Определение кратности регулировки тока возбуждения.

$$K_i = \frac{i_{\text{в max}}}{i_{\text{в min}}}.$$

Значение K_i для заданного генератора проще всего определяется при помощи двух характеристик возбуждения (фиг. 4.3): характеристики холостого хода, снятой при максимальной скорости вращения, т. е. зависимости $E = f(i_{\text{в}})$ при $R = \infty$ и $n = n_{\text{max}}$, и внешней характеристики возбуждения, снятой при минимальной скорости вращения и минимальном сопротивлении внешней цепи R_{min} , т. е. зависимости $U = f(i_{\text{в}})$ при $R = R_{\text{min}}$ и $n = n_{\text{min}}$.

Величина R_{min} берется исходя из значения максимально допустимой для данного генератора нагрузки, которую он должен обеспечивать при номинальном напряжении $U_{\text{ном}}$, т. е. $R_{\text{min}} = \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{max}}}$. Для самолетных генера-

торов обычно $I_{\text{max}} = 1,5 I_{\text{ном}}$.

Если на диаграмме фиг. 4.3 провести горизонталь через ординату, равную $U_{\text{ном}}$, то точки пересечения ее с характеристиками возбуждения определяют значения $i_{\text{в min}}$ (точка 1) и $i_{\text{в max}}$ (точка 2), зная которые, легко найти значение кратности регулировки тока возбуждения K_i .

Нетрудно убедиться, что значение K_i зависит от параметров генератора и предельных режимов работы и, в частности, от рода привода генератора.

Для самолетных генераторов значения K_i могут достигать до 7—9 и выше, тогда как для стационарных генераторов промышленного типа K_i обычно не превышает 2—2,5 в основном потому, что такие генераторы работают, как правило, при постоянной скорости вращения.

Значение K_i можно найти также по характеристикам холостого хода и нагрузочной (при $I = I_{\text{max}}$), снятым при одной и той же минимальной скорости вращения n_{min} , приняв во внимание, что при одном и том же токе возбуждения э. д. с. при холостом ходе при скорости вращения n_{max} в $\frac{n_{\text{max}}}{n_{\text{min}}}$ раз.

§ 4.3. СПОСОБЫ ВКЛЮЧЕНИЯ РЕГУЛЯТОРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Чтобы иметь возможность обеспечивать весь диапазон изменения тока возбуждения, необходимый для поддержания постоянства напряжения на зажимах самолетного генератора при изменениях в широких пределах скорости вращения и нагрузки генератора, применяются различные схемы включения регулятора возбуждения — сопротивления, величину которого можно изменять автоматически или вручную.

а) Последовательное включение регулятора возбуждения. Наиболее распространенным способом регулирования тока возбуждения является последовательное включение сопротивления, регулирующего ток возбуждения (фиг. 4.4).

Полное сопротивление цепи возбуждения $R_{\text{в}}$ равно:

$$R_{\text{в}} = r_{\text{в}} + r_{\text{д}}, \quad (4.1)$$

где $r_{\text{в}}$ — сопротивление обмотки возбуждения;
 $r_{\text{д}}$ — добавочное сопротивление.

Вводя относительные величины, имеем

$$\rho_{\text{в}} = \frac{R_{\text{в}}}{r_{\text{в}}} = 1 + \frac{r_{\text{д}}}{r_{\text{в}}} = 1 + \rho_{\text{д}}, \quad (4.2)$$

где $\rho_{\text{в}}$ — относительная величина сопротивления цепи возбуждения;

$\rho_{\text{д}}$ — относительная величина добавочного сопротивления.

Для того чтобы обеспечить заданную степень регулировки тока возбуждения K_i , для поддержания постоянства напряжения необходимо выполнение условия

$$\rho_{\text{д}} = K_i - 1. \quad (4.3)$$

При максимальном токе возбуждения относительное сопротивление цепи возбуждения $\rho_{\text{в}1} = 1$ (все добавочное сопротивление выведено), а при минимальном токе все добавочное сопротивление введено:

$$\rho_{\text{в}2} = \rho_{\text{д}} + 1. \quad (4.4)$$

Следовательно,

$$K_i = \frac{i_{\text{в}1}}{i_{\text{в}2}} = \rho_{\text{д}} + 1. \quad (4.4)$$

При регулировании тока возбуждения посредством изменения величины добавочного сопротивления в цепи возбуждения весьма существенным является вопрос о мощности, рассеиваемой в добавочном сопротивлении. В данном случае эта мощность равна

$$P_{\text{д}} = U i_{\text{в}} - i_{\text{в}}^2 r_{\text{в}} = i_{\text{в}} (U - i_{\text{в}} r_{\text{в}}), \quad (4.5)$$

где $P_{\text{д}}$ — мощность, рассеиваемая в добавочном сопротивлении;

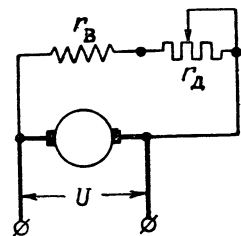
U — поддерживаемая постоянной величина напряжения на зажимах генератора;

$i_{\text{в}}$ — ток возбуждения.

Из уравнения (4.5) следует, что величина $P_{\text{д}}$ обращается в нуль при $i_{\text{в}} = 0$ и $i_{\text{в}} = \frac{U}{r_{\text{в}}}$ и, следовательно, при некотором значении $i_{\text{в}}$

$$0 < i_{\text{в}} < \frac{U}{r_{\text{в}}} = i_{\text{в} \text{ max}}$$

величина $P_{\text{д}}$ достигает максимума.



Фиг. 4.4. Последовательное включение сопротивления, регулирующего ток возбуждения.

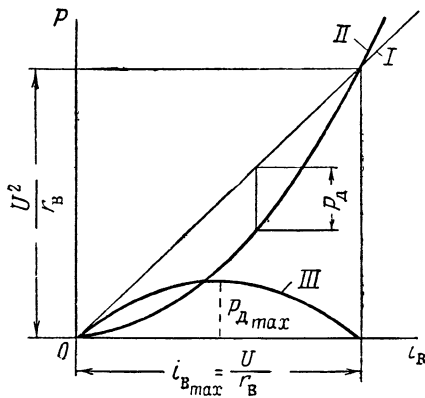
Нетрудно убедиться, что мощность, рассеиваемая в добавочном сопротивлении, достигает максимального значения:

$$P_{д\max} = \frac{1}{4} P_{в\max} \quad \text{при} \quad i_b = \frac{1}{2} i_{в\max},$$

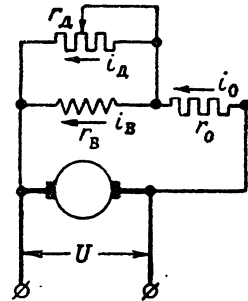
где $P_{в\max} = \frac{U^2}{r_b}$ — мощность, рассеиваемая в обмотке возбуждения при отсутствии добавочного сопротивления.

Таким образом, наибольшая мощность, рассеиваемая в добавочном сопротивлении, не превышает 25% максимальной мощности возбуждения и достигает этого значения при токе возбуждения, равном половине максимального значения тока возбуждения.

Приведенные выводы могут быть проиллюстрированы диаграммой (фиг. 4.5), на которой приведены зависимости первого и второго членов уравнения (4.5) от тока возбуждения (кривые I и II).



Фиг. 4.5. Изменение мощности P_d , рассеиваемой в добавочном сопротивлении, в зависимости от тока возбуждения i_b .



Фиг. 4.6. Параллельное включение сопротивления, регулирующего ток возбуждения.

Мощность, рассеиваемая в добавочном сопротивлении, определяется отрезками ординат, заключенными между кривыми I и II, и зависимость ее от тока возбуждения изображается кривой III.

Описанная схема отличается большой простотой, и по сравнению с другими схемами, при прочих равных условиях, как показано далее, в цепи возбуждения генератора при этом рассеивается наименьшее количество энергии.

К недостаткам этой схемы следует отнести:

1) величина тока возбуждения не может быть доведена до нуля. При разрыве цепи возбуждения (только в этом случае $i_b = 0$) может произойти повреждение изоляции, так как при исчезновении магнитного потока в обмотке возбуждения наводится э. д. с., значительно превышающая по величине э. д. с. генератора;

2) при использовании этой схемы для регулирования тока возбуждения в широком диапазоне требуется большое сопротивление.

б) Параллельное включение регуляторов возбуждения. Схема такого включения сопротивления, регулирующего ток возбуждения, изображена на фиг. 4.6.

Дополнительное сопротивление r_0 предназначено для ограничения тока генератора при $r_d=0$. При такой схеме включения ток возбуждения достигает максимального значения при r_d , стремящемся к бесконечности:

$$i_{в \max} = \frac{U}{r_в + r_0}. \quad (4.6)$$

Ток возбуждения равен нулю при $r_d=0$.

Очевидно, что для получения той же величины максимального тока возбуждения в обмотке возбуждения, которая получается при последовательном включении добавочного сопротивления, сопротивление ее должно быть меньше, чем сопротивление обмотки возбуждения при последовательном включении сопротивления, регулирующего ток возбуждения. Это является существенным недостатком параллельного включения реостата, так как уменьшение сопротивления обмотки возбуждения связано с увеличением расхода меди на обмотку возбуждения. Кроме того, эта схема, помимо регулятора возбуждения, требует наличия еще одного сопротивления, что также усложняет схему.

Мощность, рассеиваемая в шунтирующем сопротивлении, равна

$$P_d = U i_0 - i_0^2 r_0 - i_в^2 r_в = i_d^2 r_d. \quad (4.7)$$

Так как

$$i_0 = \frac{U - i_в r_в}{r_0}. \quad (4.8)$$

то

$$P_d = U i_в \frac{r_в}{r_0} - i_в^2 (r_0 + r_в) \frac{r_в}{r_0}. \quad (4.9)$$

Анализ этого выражения показывает, что при некоторой величине $i_в = i'_в$ значение P_d достигает максимальной величины. Для определения этой величины $i'_в$ нужно приравнять первую производную от P_d по $i_в$ нулю:

$$\frac{dP_d}{di_в} = U \frac{r_в}{r_0} - 2i_в (r_0 + r_в) \frac{r_в}{r_0} = 0, \quad (4.10)$$

откуда

$$i'_в = \frac{U}{2(r_в + r_0)} = \frac{1}{2} i_{в \max}. \quad (4.11)$$

Подставляя найденное значение $i'_в$ в уравнение (4.9), находят

$$P_{d \max} = \frac{U^2}{4} \frac{r_в}{r_0(r_0 + r_в)} = \frac{1}{4} P_{в \max} \frac{r_в}{r_0}, \quad (4.12)$$

где

$$P_{в \max} = \frac{U^2}{r_в + r_0} = U \cdot i_{в \max} \quad (4.13)$$

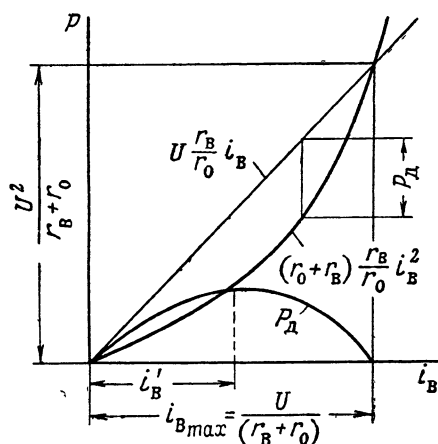
— максимальное значение мощности, поглощаемое в цепи возбуждения.

Что касается величины мощности, рассеиваемой в сопротивлении r_0 , то она будет максимальной при $i_в=0$:

$$P_{0 \max} = \frac{U^2}{r_0}. \quad (4.14)$$

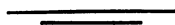
На фиг. 4.7 приведены кривые, иллюстрирующие приведенные соображения.

Таким образом, в этой схеме потери энергии в шунтирующем сопротивлении при прочих равных условиях больше, чем в схеме с последовательным включением регулятора возбуждения.



Фиг. 4.7. Изменение мощности P_d , рассеиваемой в добавочном сопротивлении (фиг. 4.6), в зависимости от тока возбуждения.

Преимущество данной схемы состоит в том, что ток возбуждения можно довести почти до нуля. Так как реостат возбуждения, присоединенный параллельно обмотке возбуждения, играет роль и разрядного сопротивления, то отключение всей цепи возбуждения от источника тока не вызывает наведения опасных для изоляции напряжений в самой обмотке возбуждения.



Глава V

СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ РЕГУЛЯТОРОВ С ПЛАВНЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ СОПРОТИВЛЕНИЯ

§ 5.1. ОБЩИЕ СВОЙСТВА УГОЛЬНЫХ КОНТАКТНЫХ РЕОСТАТОВ РЕГУЛЯТОРОВ

Регулировать ток возбуждения в генераторах постоянного тока путем плавного изменения сопротивления цепи возбуждения можно различными способами, но наиболее удобным и рациональным в практике оказалось использование для этой цели контактных угольных реостатов.

Сущность действия контактного реостата заключается в том, что электрическое сопротивление, которое возникает при соприкосновении двух или нескольких наложенных друг на друга пластин, зависит от механической силы, с которой они прижимаются друг к другу. Сопротивление реостата уменьшается с увеличением силы сжатия пластин и растет с уменьшением ее.

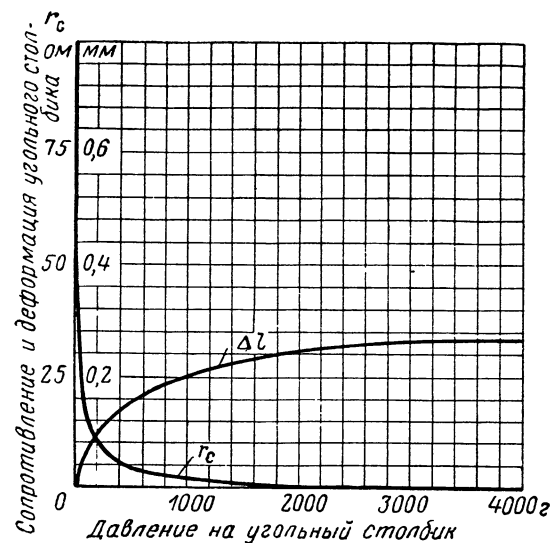
Практически такие контактные реостаты выполняются в виде столбика, состоящего из ряда наложенных друг на друга дисков или шайб из специального сорта угля. Концы этого столбика зажимаются между двумя металлическими пластинами. Во избежание изгиба столбика через отверстие в центре угольных шайб пропускается стержень, служащий направляющей и предохраняющий шайбы от бокового сдвига. В некоторых конструкциях регуляторов угольный столбик, набранный из шайб, имеет не центральную направляющую, а наружную в виде обоймы, в которую закладываются диски.

В большинстве случаев угольные столбики современных самолетных регуляторов состоят из 40—50 шайб диаметром от 5×11 до 10×18 мм, толщиной 0,5—1 мм. Шайбы выполняются из электрографитированного угля с удельным сопротивлением от 0,0025 до 0,01 омсм, обладающего твердостью 40—60 Н (по Шору).

На фиг. 5.1 представлена диаграмма, которая наглядно иллюстрирует зависимость от давления сопротивления R и деформации Δl столбика высотой в 40 мм, набранного из угольных шайб толщиной в 0,5 мм с диаметром 10/18 мм.

Изменяя давление на столбик в пределах его упругих деформаций, можно плавно изменять его электрическое сопротивление от долей ома до нескольких тысяч омов. Однако на практике используют далеко не весь диапазон возможного изменения сопротивления столбика, так как в области малых давлений ничтожные изменения давления приводят к весьма значительным изменениям сопротивления. Вследствие этого значение сопротивления угольного столбика при малом давлении очень

неустойчиво и сильно зависит от положения столбика, от трения шайб о направляющие, от вибрации и температуры. У самолетных регуляторов напряжения в режиме нормальной работы максимальное сопротивление угольного столбика обычно не превышает 100 ом. Давление на столбик изменяется от нескольких граммов до 2—5 кг.



Фиг. 5. 1. Зависимость сопротивления и деформации угольного столбика самолетного регулятора напряжения от давления.

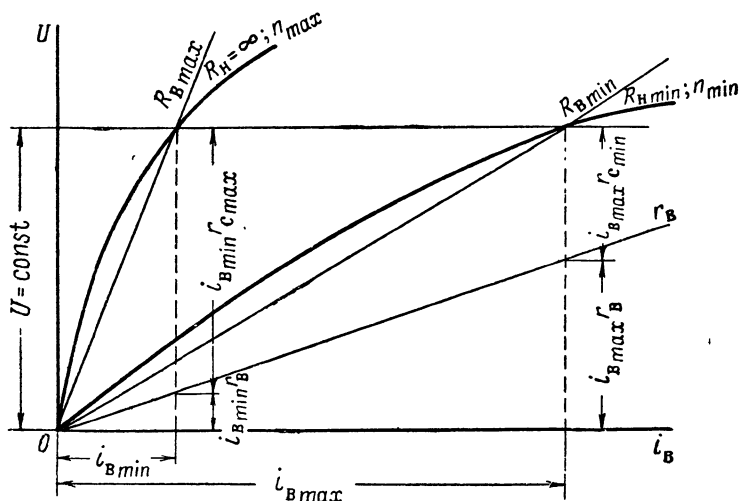
Деформация столбика (уменьшение его длины) под действием этих сил равна 0,25—0,35 мм. Минимальное сопротивление угольного столбика регуляторов напряжения для мощных генераторов обычно составляет 0,4—0,8 ом и только в некоторых случаях (для генераторов малой мощности) оно доходит до 3—4 ом.

Уголь обладает отрицательным температурным коэффициентом, и сопротивление столба можно определять по формуле

$$R = R_{C20} [1 + \alpha (\vartheta - 20)],$$

$$\text{где } \alpha = -\frac{1}{420}.$$

Для того чтобы найти пределы необходимого изменения сопротивления угольного столбика, можно воспользоваться диаграммой, изображенной на фиг. 5. 2, на которой нанесены характеристики возбуждения



Фиг. 5. 2. Определение пределов изменения сопротивления угольного столбика регулятора напряжения.

генератора для двух предельных режимов: для холостого хода при максимальной скорости вращения ($R_n = \infty, n_{max}$) и для максимально допустимой нагрузки при минимальной скорости вращения ($R_{n\ min}, n_{min}$).

Проводя горизонталь через ординату, соответствующую значению напряжения на зажимах генератора, которое желательно поддерживать постоянным, легко найти лучи для максимального ($R_{в\max}$) и минимального ($R_{в\min}$) сопротивлений цепи возбуждения для обоих упомянутых выше предельных случаев, а также соответствующие им токи возбуждения $i_{в\min}$ и $i_{в\max}$. Если на диаграмме провести луч, соответствующий сопротивлению обмотки возбуждения $r_в$, и учесть, что $R_{в\max} = r_в + r_{с\max}$, а $R_{в\min} = r_в + r_{с\min}$, где $r_{с\max}$ и $r_{с\min}$ — максимальное и минимальное сопротивления угольного реостата, то легко понять, что для каждого из рассмотренных случаев эти сопротивления выражаются в масштабе отрезками ординат между лучами сопротивлений цепи возбуждения и обмотки возбуждения. Для определения значений $r_с$ следует разделить эти отрезки, выраженные в вольтах, на соответствующие им значения тока возбуждения $i_в$ в амперах.

Так как при расчете угольных контактных регуляторов приходится в основном руководствоваться необходимостью иметь определенную величину падения напряжения в дополнительном сопротивлении, то пределы изменения падений напряжения в угольном столбике легко вычислить, если известны токи $i_{в\min}$ и $i_{в\max}$, сопротивление обмотки возбуждения $r_в$ и напряжение генератора U .

По этим данным легко найти:

$$U_{с\min} = U - i_{в\max} r_в; \quad U_{с\max} = U - i_{в\min} r_в \quad (5.1)$$

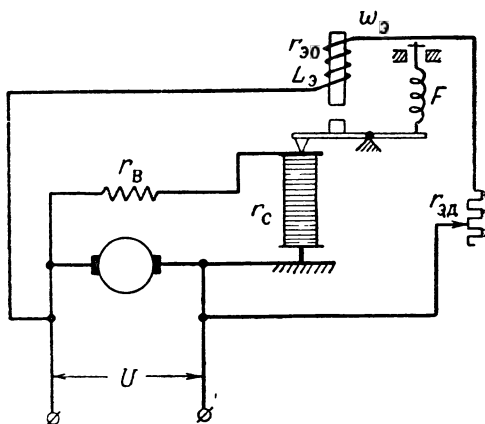
и

$$\Delta U_с = U_{с\max} - U_{с\min} = (i_{в\max} - i_{в\min}) r_в = \frac{\Delta i_в}{i_{в\max}} U, \quad (5.2)$$

где $U_с$ — напряжение на зажимах угольного столбика.

§ 5.2. ПРИНЦИП УСТРОЙСТВА УГОЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ НАПЯЖЕНИЯ

На фиг. 5.3 изображена схема устройства для автоматического регулирования напряжения генераторов постоянного тока. Как видно из фиг. 5.3, последовательно с обмоткой возбуждения генератора включен столбик $r_с$, состоящий из тонких угольных пластинок или шайб, сжатых под действием пружины. Давление на угольный столбик может уменьшаться или вновь увеличиваться при помощи электромагнита, якорь которого расположен на рычаге нажимного устройства. Обмотка электромагнита w_3 , через добавочное сопротивление $r_{зд}$ присоединена к зажимам генератора. Если напряжение генератора увеличивается, то давление на столбик уменьшается, сопротивление столбика соответственно увеличивается, ток возбуждения генератора уменьшается и, таким образом, ограничивается повышение напряжения.



Фиг. 5.3. Принципиальная схема включения угольного регулятора напряжения.

Наиболее распространенная конструкция угольного регулятора напряжения самолетного типа изображена на фиг. 5.4. Такой регулятор

ной обмоткой включено постоянное добавочное сопротивление температурной компенсации R_1 и регулируемое сопротивление — реостат R_n .

В торцевой фланец корпуса электромагнита ввернут регулируемый сердечник 9 электромагнита, вращением которого при первоначальной настройке устанавливается необходимый воздушный зазор в магнитной системе регулятора (между якорем и этим сердечником).

Начальное сжатие угольного столбика устанавливается также при первоначальной настройке регулятора вращением регулировочного винта 3.

Пока ток в обмотке w , электромагнита остается меньше некоторого определенного значения, зависящего от настройки регулятора, сила магнитного притяжения, действующая на якорь регулятора, оказывается меньше противодействующей силы, создаваемой первоначально сжатой пружиной 13, и якорь находится в одном из своих крайних положений, когда угольный столбик максимально сжат и имеет, следовательно, минимальное сопротивление.

По мере увеличения тока в обмотке электромагнита сверх упомянутого значения сила магнитного притяжения возрастает и, оказываясь больше противодействующей силы пружины, вызывает перемещение якоря по направлению к сердечнику электромагнита и одновременно дальнейшее сжатие пружины. Вследствие этого каждому значению установившегося тока соответствует определенное положение якоря, когда последний находится в состоянии равновесия под действием приложенных к нему сил. В свою очередь сжатие угольного столбика при этом уменьшается и каждому положению якоря соответствует свое сопротивление угольного столбика, увеличивающееся по мере увеличения тока в обмотке электромагнита.

При достижении током в обмотке электромагнита некоторого верхнего предельного значения якорь приходит в другое крайнее положение, соответствующее минимальному воздушному зазору между якорем и сердечником. При этом сжатие угольного столбика становится наименьшим, а сопротивление — наибольшим. Дальнейшее увеличение тока не может вызывать перемещения якоря, а следовательно, и изменений сопротивления угольного столбика. Минимальный воздушный зазор между якорем и сердечником обычно фиксируется при помощи установочной немагнитной прокладки или мембраны. Полный ход якоря электромагнита обычно не превышает 0,25—0,35 мм.

При предыдущих рассуждениях не принималась во внимание сила упругой реакции угольного столбика, действующая на якорь согласно с силой магнитного притяжения. Эта сила является результатом действия сил упругих деформаций угольных шайб, возникающих при сжатии их. Однако это обстоятельство ни в какой мере не влияет на качественную сторону описываемых процессов.

На фиг. 5.4 изображена лишь принципиальная схема включения регулятора. На самом деле она значительно сложнее, так как для повышения устойчивости в схему вводится ряд дополнительных элементов.

Известно, что улучшение условий устойчивой работы системы регулирования можно достигнуть в ряде случаев введением искусственного вязкого трения подвижных частей.

Угольный регулятор описанного типа характерен тем, что ход подвижных частей его измеряется долями миллиметра, и при таких малых перемещениях очень трудно создать искусственное вязкое трение. Здесь имеет место сухое (так называемое кулоновское) трение, которое не всегда может улучшить характер переходного процесса регулирования.

Это вызывает необходимость введения в электрическую схему регулятора добавочных элементов, роль которых будет выяснена ниже.

Температурная компенсация в регуляторах напряжения обычно осуществляется двумя способами:

а) Включением последовательно с рабочей обмоткой электромагнита добавочного сопротивления, которое выполняется из материала с малым температурным коэффициентом сопротивления (константан). Соотношение сопротивлений меди обмотки электромагнита и константана добавочного сопротивления выбираются обычно порядка 1 : 5.

Так как общее сопротивление цепи электромагнита, включающее в себя сопротивление обмотки электромагнита и добавочное сопротивление, значительно превосходит сопротивление обмотки электромагнита, то изменение сопротивления обмотки электромагнита в результате нагрева мало сказывается на изменении общего сопротивления, а следовательно, и на изменении тока в цепи электромагнита при заданном постоянном напряжении.

б) Включением обмотки температурной компенсации $w_{т.к}$, расположенной на сердечнике электромагнита регулятора, на зажимы генератора.

Магнитодвижущая сила этой обмотки составляет примерно 10% от м. д. с. основной обмотки, а направление м. д. с. этой обмотки противоположно м. д. с., создаваемой рабочей обмоткой $w_э$. При таком соединении обмоток электромагнита регулятора его результирующая м. д. с. создается разностью ампервитков основной, рабочей обмотки $w_э$ и обмотки температурной компенсации, т. е.

$$Aw_{рез} = Aw_э - Aw_{т.к} = U \left[\frac{w_э}{R_1 + R_{д0} + R_{э0}(1 + \alpha\vartheta)} - \frac{w_{т.к}}{R_{т.к0}(1 + \alpha\vartheta)} \right], \quad (5.3)$$

где R_1 — сопротивление температурной компенсации, величина которого практически не изменяется;

$R_{д0}$ — подстроечное сопротивление, выполненное из константана;

$R_{э0}$ — сопротивление обмотки электромагнита при $\vartheta = 20^\circ \text{C}$;

$R_{т.к0}$ — сопротивление обмотки температурной компенсации при $\vartheta = 20^\circ \text{C}$;

α — температурный коэффициент сопротивления меди,

или

$$Aw_{рез} = U \left[\frac{w_э}{(R_1 + R_{д0} + R_{э0}) \left(1 + \frac{R_{э0}}{R_1 + R_{д0} + R_{э0}} \alpha\vartheta \right)} - \frac{w_{т.к}}{R_{т.к0}(1 + \alpha\vartheta)} \right] \quad (5.4)$$

при $\alpha\vartheta \ll 1$.

$$Aw_{рез} \approx U \left[\frac{w_э}{R_1 + R_{д0} + R_{э0}} \left(1 - \frac{\alpha\vartheta R_{э0}}{R_1 + R_{д0} + R_{э0}} \right) - \frac{w_{т.к}}{R_{т.к0}} (1 - \alpha\vartheta) \right]. \quad (5.5)$$

Для того чтобы результирующие ампервитки не зависели от температуры, необходимо выполнить условие компенсации:

$$\frac{w_э R_{э0}}{(R_1 + R_{д0} + R_{э0})^2} - \frac{w_{т.к}}{R_{т.к0}} = 0. \quad (5.6)$$

Если выбрать $w_{т.к}$ и $R_{т.к0}$ так, чтобы было удовлетворено равенство (5.6), то

$$Aw_{рез} = U \left[\frac{w_э}{R_1 + R_{д0} + R_{э0}} - \frac{w_{т.к}}{R_{т.к0}} \right], \quad (5.7)$$

которые практически остаются постоянными при изменении температуры. Таким способом удастся значительно увеличить точность работы регуля-

тора, почти полностью устранив влияние температуры на результирующую м. д. с.

В процессе работы регулятора угольный столбик выделяет значительное количество тепла, которое может вызвать чрезмерный нагрев и ускоренный износ угольных шайб, изменение характеристики пружины и удлинение деталей регулятора. Так как все эти факторы способствуют уменьшению точности работы регулятора, то для их устранения в современных регуляторах обычно прибегают к следующим конструктивным мероприятиям:

а) Угольный столбик помещают в ребристый корпус из алюминиевого сплава, благодаря чему обеспечивается более эффективный отвод тепла в окружающую атмосферу.

б) Ребристый корпус отделяется от катушки экраном в виде стального колпачка, в котором располагается узел якоря регулятора.

Одним из типов угольных регуляторов напряжения, выпускаемых отечественной промышленностью, является угольный регулятор напряжения типа Р-25-А, который предназначен для поддержания постоянства напряжения самолетных генераторов мощностью до 12 000 *вт* (с номинальным напряжением 28,5 *в* и током возбуждения 0,9—8 *а*). Кроме того, регулятор обеспечивает параллельную работу нескольких однотипных генераторов на общую нагрузку, для чего на сердечнике электромагнита его расположена выравнивающая обмотка.

Регулятор типа Р-25-А поддерживает напряжение 28,5 *в* при средней скорости вращения генератора и нормальной окружающей температуре (+20° С). При изменениях скорости вращения генератора в рабочем диапазоне и изменениях нагрузки от нуля до номинальной при температуре +20° С регулятор напряжения поддерживает напряжение в пределах 27,5—29,5 *в*; при изменениях температуры окружающей среды от —60 до +50° С и при тех же изменениях скорости и нагрузки — в пределах 27—30 *в*.

С помощью регулировочного реостата можно изменять напряжение генератора в пределах $28,5 \pm 1,5 \frac{в}{3 в}$. Вес комплекта 1,85 *кг*.

Максимальная рассеиваемая мощность в угольном столбике не должна превышать 85 *вт*.

Регулятор напряжения укрепляется на плите с амортизаторами для предохранения его от вибрации и тряски и может работать при вибрации мест крепления с частотой 30—80 *гц* при ускорении до 2,5 *g*. Регулятор выдерживает кратковременную тряску с частотой от 60 до 100 ударов в минуту при ускорении до 4 *g*, соответствующую взлету и посадке самолета.

Аналогичные регуляторы выпускаются и для работы с генераторами мощностью до 18 *квт* при изменении тока возбуждения от 2 до 15 *а*.

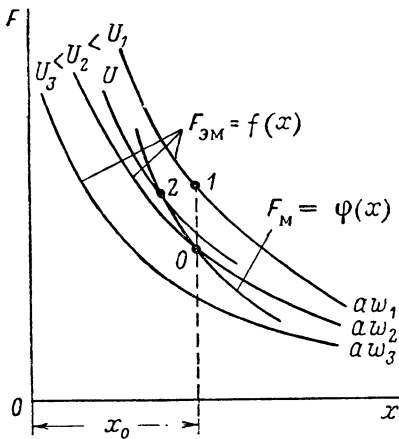
Увеличение токов возбуждения привело к необходимости рассеивать на столбе мощность до 170—500 *вт*.

Для этой цели керамические втулки в регуляторе заменены анодированными и увеличена поверхность теплоотдачи как за счет увеличения высоты и диаметра угольного столбика, так и за счет увеличения поверхности теплоотдачи радиатора.

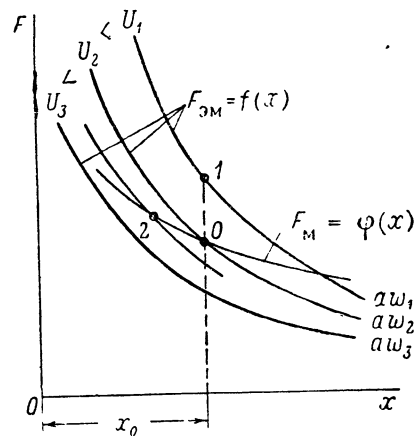
§ 5.3. НАСТРОЙКА УГОЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПЯЖЕНИЯ

В зависимости от характера и взаимного расположения электромеханической и механической характеристик угольного регулятора регулирование напряжения может быть статическим или астатическим. На фиг. 5.5 изображен случай, когда наклон электромеханических характе-

ристик $F_{эм} = f(x)$ меньше наклона механической характеристики $F_m = \varphi(x)$. В положении равновесия, соответствующем пересечению электро-механической и механической характеристик при зазоре $x = x_0$ (точка 0), регулируемое напряжение равно U_2 . После нарушения равновесия (например, вследствие сброса нагрузки) напряжение сразу увеличивается до величины $U_1 > U_2$. Так как воздушный зазор x_0 сразу измениться не может, то рабочая точка в первый момент времени попадает на электро-механическую характеристику, соответствующую напряжению U_1 (точка 1).



Фиг. 5.5. Электро-механические и механическая характеристики регулятора при настройке на положительный статизм.



Фиг. 5.6. Электро-механические и механическая характеристики регулятора при настройке на отрицательный статизм.

Вследствие увеличения напряжения регулятор приходит в действие, воздушный зазор x начинает уменьшаться и рабочая точка перемещается влево, пока не попадает снова на механическую характеристику $F_m = \varphi(x)$ (точка 2). Нетрудно видеть, что новому положению равновесия соответствует напряжение U , большее, чем напряжение U_2 , которое соответствовало старому положению равновесия. Таким образом, в рассматриваемом случае регулятор настроен так, что уменьшение нагрузки приводит к увеличению напряжения, и, наоборот, т. е. характеристика регулятора имеет падающий с нагрузкой характер. Такая настройка регулятора, когда с увеличением нагрузки регулируемое напряжение падает, называется настройкой с положительным статизмом.

Если наклон электро-механических характеристик больше наклона механической характеристики (фиг. 5.6), то аналогичные рассуждения показывают, что с уменьшением нагрузки регулируемое напряжение уменьшается: $U < U_2$, и, наоборот, т. е. статическая характеристика регулятора имеет восходящий характер. Подобная настройка регулятора называется настройкой с отрицательным статизмом.

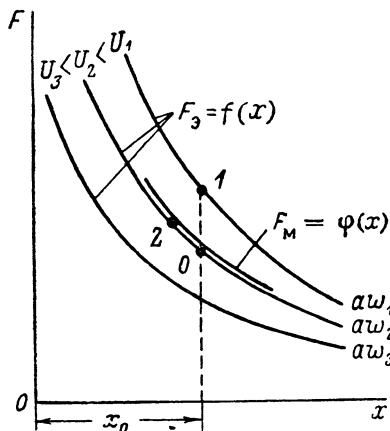
Наконец, на фиг. 5.7 изображен случай, когда электро-механическая и механическая характеристики совпадают.

В этом случае в конце процесса регулирования рабочая точка должна лежать на первоначальной характеристике, но быть смещенной относительно 0 (точка 2), так как при данной настройке регулятора это соответствует состоянию равновесия при новом режиме работы. Последний случай соответствует астатической настройке регулятора.

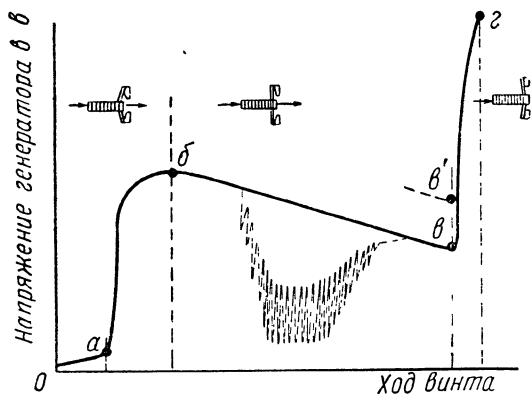
Самолетные угольные регуляторы напряжения, как правило, настраиваются на положительный статизм. Такая настройка способствует увеличению срока службы регулятора и повышает динамическую устойчивость процесса регулирования и вследствие этого способствует увеличению срока службы регулятора.

Первоначальную настройку регулятора для работы с заданным генератором производят соответствующей установкой воздушного зазора между сердечником электромагнита и якорем и начальным нажатием на угольный столбик.

Перед настройкой регулятора поворачивают сердечник электромагнита, устанавливая его в начальное положение (минимальный воздуш-



Фиг. 5.7. Электромеханические и механические характеристики регулятора при астатической настройке.



Фиг. 5.8. Зависимость напряжения генератора от положения регулировочного винта в процессе настройки регулятора напряжения.

ный зазор). Затем приступают к установке начального сжатия угольного столбика при помощи регулировочного винта.

При ввертывании регулировочного винта, начиная с положения, при котором угольный столбик полностью разжат, напряжение генератора изменяется в соответствии с кривой, изображенной на фиг. 5.8 (настройка регулятора напряжения производится при средней эксплуатационной скорости вращения генератора).

Сначала, при осевом перемещении регулировочного винта от точки O до a , пока устраняются только зазоры между шайбами угольного столбика, напряжение генератора почти не отличается от напряжения, наводимого от остаточного магнетизма генератора. Начиная с точки a напряжение генератора быстро возрастает. За точкой b регулятор обычно становится нестабильным, так как пружина начинает вибрировать, вызывая резкие колебания напряжения генератора. Амплитуда колебаний пружины может быть столь значительной, что контакт между угольными шайбами нарушается и между шайбами образуется дуга, приводящая к разрушению шайб.

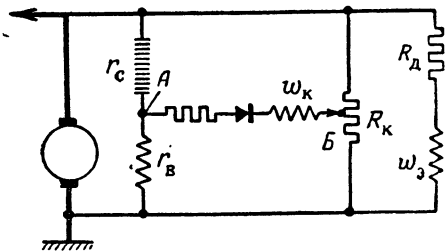
При дальнейшем перемещении винта в точке b вибрации пружины прекращаются и регулятор становится стабильным. Участок bc соответствует устойчивой работе регулятора.

Если винт поворачивать дальше, то столбик оказывается полностью сжатым, сопротивление его становится минимальным и регулирование напряжения прекращается. Поэтому ввертывание регулировочного винта прекращают в точке c перед повторным повышением напряжения. Поло-

жение регулировочного винта в точке *в* является исходным для окончательной настройки регулятора напряжения. При этом положении винта механическая характеристика регулятора почти соответствует его электромагнитной характеристике, и регулятор приобретает способность регулировать напряжение генератора. Однако величина регулируемого напряжения при этом обычно бывает значительно ниже номинальной, а точность регулирования напряжения выходит за допустимые пределы.

Доведение регулируемого напряжения до требуемого уровня достигается увеличением воздушного зазора между якорем и сердечником электромагнита. При увеличении зазора вся кривая зависимости напряжения генератора от хода регулировочного винта смещается вверх и точка *в* занимает место *в'*.

Регулируемое напряжение повышается с увеличением воздушного зазора потому, что вследствие увеличения магнитного сопротивления тре-



Фиг. 5.9. Включение корректирующей обмотки регулятора напряжения.

буется большая м. д. с., а следовательно, и большее напряжение генератора. Поэтому при новом положении сердечника электромагнита электромагнитная характеристика регулятора соответствует уже новому значению напряжения, которое поддерживает регулятор напряжения.

Для получения того или иного характера регулирования напряжения настройку регулятора осуществляют тем же регулировочным винтом. Для получения падающей

характеристики регулирования регулировочный винт немного ввертывают, а для получения восходящей характеристики — вывертывают.

Характер регулирования напряжения изменяется с изменением положения регулировочного винта относительно точки *в'* вследствие того, что при этом устанавливается различное соотношение между электромагнитной и механической характеристиками регулятора.

При вывертывании регулировочного винта уменьшается натяжение пружин и сжатие угольного столбика. Вследствие этого настройка регулятора становится более статической. При ввертывании регулировочного винта происходит обратное явление и настройка регулятора приближается к астатической.

Для повышения точности регулирования в некоторых регуляторах напряжения на сердечнике электромагнита регулятора размещают еще корректирующую обмотку w_k , включаемую, как указано на фиг. 5.9.

Корректирующая обмотка предназначена для уменьшения несоответствия механической и электромагнитной характеристик, которые, как это видно на фиг. 5.10, имеют наибольшее рассогласование на участке x_1x_2 . Работа на этом участке происходит при малых скоростях вращения и при больших нагрузках генератора. Если корректирующей обмотки не применять, то при положении якоря электромагнита на расстоянии x_2 от сердечника, напряжение генератора снижается по сравнению с напряжением при положении якоря на расстоянии x_1 , вследствие того что состояние равновесия наступает при x_2 , при меньшем значении м. д. с. электромагнита регулятора, а следовательно, и при меньшем напряжении.

Корректирующая обмотка включена в диагональ моста, состоящего из сопротивлений угольного столбика r_c , обмотки возбуждения r_v и двух частей сопротивления R_k . М. д. с. корректирующей обмотки направлена навстречу м. д. с. основной обмотки.

Когда якорь электромагнита занимает положение x_1 , соответствующее сопротивлению угольного столбика $r_{с1}$, потенциал точки A равен потенциалу точки B , и ток через корректирующую обмотку не протекает. При перемещении якоря в сторону положения x_2 (при уменьшении сопротивления столбика, которое должно иметь место при уменьшении скорости вращения генератора или при увеличении нагрузки) потенциал точки A становится больше потенциала точки B . Через корректирующую обмотку протекает ток и результирующая, м. д. с. уменьшается.

Положение равновесия якоря при зазоре x_2 имеет место при результирующих ампервитках электромагнита AW_{p2} , когда электромагнитная сила, создаваемая ими, уравновешивается силами пружины реакции угольного столбика.

Если корректирующей обмотки нет, то

$$AW_{p2} = \frac{U_2}{R_9} \omega_9 = AW_{s2},$$

т. е. сила пружины и реакции угольного столбика уравновешиваются силой, создаваемой только основной обмоткой электромагнита.

При наличии корректирующей обмотки

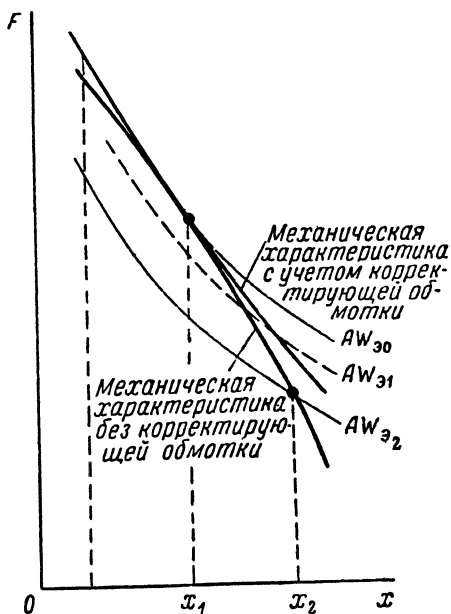
$$AW_{p2} = \frac{U_1}{R_9} \omega_9 - AW_k = AW_{s1} - AW_k,$$

$$AW_{p2} + AW_k = AW_{s1} = \frac{U_1}{R_9} \omega_9,$$

т. е. сила пружины как бы несколько возрастает за счет действия корректирующей обмотки, и, следовательно, равновесие наступает при большем значении ампервитков основной обмотки $AW_{s1} > AW_{s2}$, т. е. при большем значении напряжения $U_1 > U_2$.

При настройке схемы коррекции движок сопротивления располагают так, чтобы корректирующая обмотка вступала в работу (т. е. чтобы потенциал точки A становился выше потенциала точки B) примерно со скорости вращения 5000 об/мин и ниже.

При увеличении скорости вращения генератора потенциал точки A становится меньше потенциала точки B , что приводит к появлению в корректирующей обмотке тока обратного направления, увеличению ампервитков электромагнита и уменьшению напряжения. Для предотвращения этого в цепи корректирующей обмотки установлен селеновый выпрямитель, препятствующий прохождению тока от точки B к точке A .



Фиг. 5. 10. Соотношение механической и электромагнитной характеристик угольного регулятора напряжения.

§ 5. 4. ДИНАМИКА ПРОЦЕССА РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ УГОЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА

К угольному регулятору, предназначенному для самолетных генераторов, предъявляется требование поддержания напряжения с точностью, не выходящей за пределы $\pm 1,5\%$ (это требование относится, конечно, к установившимся значениям регулируемого напряжения, так как в процессе регулирования отклонения напряжения от заданного уровня могут

достигать значительных величин). Кроме того, естественно, ставятся требования в отношении динамической устойчивости процесса регулирования и возможно меньшего времени переходного процесса стабилизации.

Для того чтобы выполнить эти требования, параметры регулятора должны быть выбраны в соответствии с параметрами регулируемого объекта.

Процесс регулирования (стабилизации) напряжения посредством автоматического регулятора, если нагрузка или внешнее воздействие меняется произвольно, представляет собой весьма сложное явление, поэтому ниже рассматривается динамика процесса регулирования напряжения самолетного генератора для частного случая, когда нагрузка от одного установившегося режима переходит к другому стационарному состоянию мгновенно. Такой переход может иметь место при внезапном изменении нагрузки самолетного генератора или вследствие резкого изменения скорости вращения.

В дальнейшем рассматриваются лишь малые отклонения от заданного положения равновесия, что и имеет место при действительном процессе регулирования, если этот процесс устойчив.

Уравнение движения якоря электромагнита

В положении равновесия на якорь электромагнита действуют три силы: сила реакции угольного столбика F_c и сила электромагнитного притяжения $F_{эл}$, направленные в одну сторону, и уравнивающая их сила сжатой пружины $F_{пр}$, направленная в противоположную сторону.

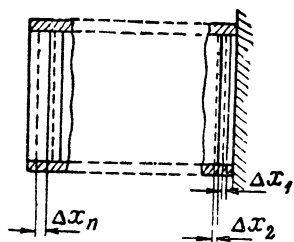
Пусть Δx означает перемещение якоря электромагнита от первоначального положения равновесия. Когда якорь электромагнита приближается к сердечнику, то угольный столбик разжимается, и, наоборот, при увеличении зазора между якорем и сердечником электромагнита угольный столбик сжимается.

При перемещении якоря сила электромагнитного притяжения изменяется вследствие как изменения воздушного зазора, так и изменения тока в обмотке электромагнита.

При исследовании динамики механических процессов угольного регулятора следует учитывать силы инерции подвижных частей. Общая или приведенная масса M подвижных частей регулятора складывается из массы якоря электромагнита $m_я$, приведенной массы пружины $m_{пр}$ и приведенной к якорю массы угольного столбика M_c' .

Можно сделать допущение, что при общей деформации всего угольного столбика отдельные пластины или шайбы в среднем имеют одну и ту же деформацию, так как все они находятся почти под одинаковой силой сжатия, однако при этом перемещения каждой пластины или шайбы различны. С целью упрощения исследования распределенную массу угольного столбика заменяют приведенной, сосредоточенной в центре массы якоря. На фиг. 5.11 схематично изображен угольный столбик регулятора. Та пластина угольного столбика, которая плотно прилегает к неподвижному основанию в остоле регулятора, имеет определенную упругую деформацию при сжатии.

Если обозначить через Δx_1 перемещение, вызванное упругой деформацией от изменения силы сжатия этой пластины или шайбы столбика, то перемещение второй пластины относительно неподвижного основания



Фиг. 5.11. Схематическое изображение относительных перемещений шайб угольного столбика.

столбика равно $\Delta x_2 = 2\Delta x_1$, третьей $\Delta x_3 = 3\Delta x_1$ и т. д. и, наконец, последней $\Delta x_n = n\Delta x_1$.

Последняя пластина угольного столбика прилегает к якору электромагнита, и поэтому ее перемещение одинаково с перемещением якоря, т. е.

$$\Delta x_n = n\Delta x_1 = \Delta x_{\text{я}}. \quad (5.8)$$

Если масса каждой угольной пластины равна m_1 , то можно считать, что силы инерции равны:

$$\text{первой пластины } m_1 \frac{d^2 \Delta x_1}{dt^2};$$

$$\text{второй пластины } 2m_1 \frac{d^2 \Delta x_1}{dt^2},$$

$$n\text{-ой пластины } nm_1 \frac{d^2 \Delta x_1}{dt^2}.$$

Для того чтобы найти общую силу инерции всего угольного столбика, необходимо просуммировать силы инерции отдельных шайб.

Если через M_c' обозначить массу угольного столбика, приведенную к якору, то

$$M_c' \frac{d^2 \Delta x_{\text{я}}}{dt^2} = \sum_{i=1}^n m_1 i \frac{d^2 \Delta x_1}{dt^2} = m_1 \frac{n(n+1)}{2} \frac{d^2 \Delta x_1}{dt^2}. \quad (5.9)$$

Принимая во внимание, что

$$\Delta x_{\text{я}} = n\Delta x_1 \quad (5.10)$$

и

$$M_c = nm_1, \quad (5.11)$$

где M_c — масса всего угольного столбика, получаем

$$M_c' = \frac{1}{2} M_c \frac{n+1}{n}; \quad (5.12)$$

при больших значениях n (в самолетных угольных регуляторах $n \geq 40 \div 50$) приведенная масса с достаточным приближением получается равной

$$M_c' \approx \frac{1}{2} M_c. \quad (5.13)$$

Таким образом, приведенная масса угольного столбика самолетного регулятора может быть принята равной половине действительной массы всего угольного столбика.

Общая масса подвижных частей регулятора, приведенная к якору электромагнита,

$$M = m_{\text{я}} + m_{\text{пр}} + \frac{M_c}{2}. \quad (5.14)$$

Кроме сил инерции, на якорь действуют механическая сила противодействия пружины, сила притяжения электромагнита и сила реакции угольного столбика.

На фиг. 5.12 приведена зависимость силы пружины (кривая $F_{\text{пр}}$) и экспериментальная зависимость силы реакции угольного столбика от перемещения (кривая F_c). Расчет зависимости этой силы от перемещения представляет собой довольно сложную задачу.

Сила реакции угольного столбика и сила реакции пружины направлены в противоположные стороны, и, следовательно, механическую ха-

рактическую характеристику регулятора можно построить в виде зависимости (фиг. 5.12)

$$F_M = F_{пр} - F_c. \quad (5.15)$$

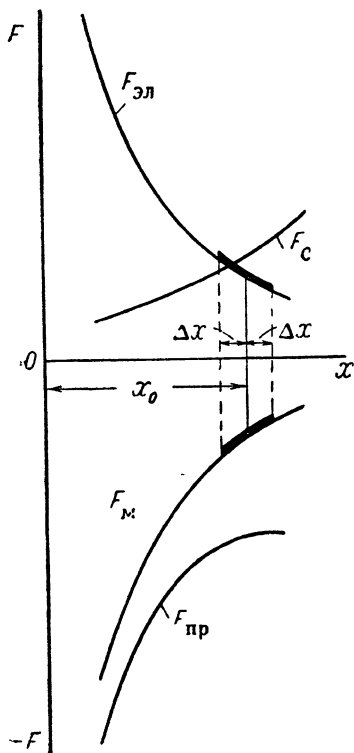
При небольших отклонениях Δx от положения равновесия $x = x_0$, в котором сила электромагнита уравнивается механической силой, зависимость F_M от x можно считать линейной.

Тогда для приращения силы F_M можно написать

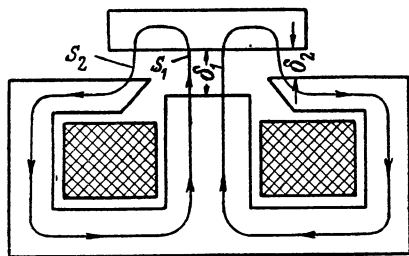
$$\Delta F_M = k_M \Delta x. \quad (5.16)$$

Если изменить настройку регулятора так, чтобы начальное натяжение пружины характеризовалось координатой не x_0 , а x_0' , то коэффициент k_M нужно взять иным, соответствующим этому новому положению равновесия:

$$k_M = f(x) = \left(\frac{\partial F_M}{\partial x} \right)_{x=x_0'}. \quad (5.17)$$



Фиг. 5.12. Механическая характеристика регулятора.



Фиг. 5.13. Схематическое изображение магнитной системы электромагнита.

Сила электромагнитного притяжения может быть представлена следующим образом:

$$F_{эл} = -AW^2 \frac{dG}{dx}, \quad (5.18)$$

где G — магнитная проводимость цепи электромагнита;

AW — ампервитки обмотки электромагнита.

На фиг. 5.13 схематически представлена магнитная система электромагнита. По эскизу магнитной цепи можно найти магнитную проводимость цепи $G = \frac{1}{R_{мг}}$.

В первом приближении

$$R_{мг} = \frac{\delta_1}{S_1} + \frac{\delta_2}{S_2} + R_{ж}, \quad (5.19)$$

где δ_1 и δ_2 — приведенные воздушные зазоры между якорем и сердечником;

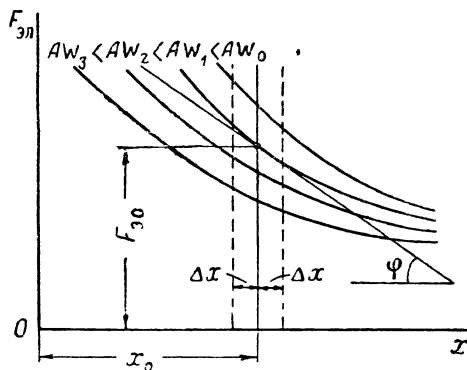
S_1 и S_2 — приведенные площади сечения магнитного потока в воздушном зазоре;

$R_{ж}$ — сопротивление железной части магнитопровода электромагнита.

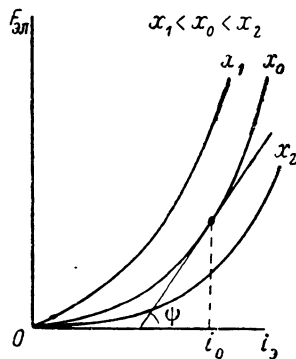
Выражая изменения величин δ_1 и δ_2 посредством x , а AW — через произведение тока на число витков обмотки электромагнита и подставляя полученное выражение в (5.16), находят зависимость силы притяжения электромагнита $F_{эл}$ от тока в обмотке электромагнита и положения якоря x .

Семейство кривых, выражающих зависимость силы притяжения электромагнита от перемещения якоря, при различных ампервитках обмотки электромагнита (семейство электромеханических характеристик электромагнита) приведено на фиг. 5.14.

Положению равновесия, определяемому координатой x_0 , соответствует сила притяжения электромагнита $F_{э0}$. При малых отклонениях от этого положения равновесия электромагнитные характеристики можно



Фиг. 5.14. Электромеханические характеристики электромагнита.



Фиг. 5.15. Тяговые характеристики электромагнита.

заменить отрезками прямых линий, и тогда при постоянной величине тока обмотки электромагнита ($AW_s = \text{const}$) изменение силы электромагнитного притяжения можно принять равным

$$\Delta F'_{эл} = K_\delta \Delta x, \quad (5.20)$$

где $k_\delta = -\frac{\partial F_{эл}}{\partial x} = \text{tg } \varphi$ характеризует жесткость электромагнитной характеристики.

При ненасыщенной магнитной системе, если величина воздушного зазора остается постоянной, то сила притяжения якоря пропорциональна квадрату ампервитков, а изменение силы притяжения электромагнита $\Delta F'_{эл}$ от изменения тока получается пропорциональным разности квадратов ампервитков, т. е.

$$\Delta F'_{эл} = (AW_1 + \Delta AW_1)^2 - AW_1^2 = 2AW_1 \Delta AW_1 + (\Delta AW_1)^2. \quad (5.21)$$

Если пренебречь малой величиной второго порядка — членом $(\Delta AW_1)^2$, то $\Delta F'_{эл}$ может быть выражено следующим образом:

$$\Delta F'_{эл} = k_\delta \Delta i_\delta, \quad (5.22)$$

где $k_\delta = \frac{\partial F'_{эл}}{\partial i_\delta}$ при заданном значении воздушного зазора пропорционально $\text{tg } \varphi$ (фиг. 5.15).

При одновременном изменении ампервитков и воздушного зазора изменение силы притяжения электромагнита равно

$$\Delta F_{эл} = k_\delta \Delta x + k_\delta \Delta i_\delta. \quad (5.23)$$

Очевидно, что коэффициенты k_s и k_d также зависят от того положения равновесия, вблизи которого исследуется процесс регулирования.

Кроме рассмотренных выше сил, на якорь электромагнита действуют еще две силы:

а) сила сухого (кулоновского) трения в основном за счет трения угольных шайб о стенки фарфоровой трубки, эта сила меняет свой знак при изменении знака скорости движения якоря;

б) сила воздушного демпфирования; угольный столбик можно рассматривать как своеобразный воздушный демпфер, причем сила демпфирования пропорциональна скорости движения якоря:

$$F_{\text{д. возд}} = k_d \frac{dx}{dt}. \quad (5.24)$$

Эта сила при малых отклонениях от положения равновесия равна

$$\Delta F_{\text{д. возд}} = k_d \frac{d\Delta x}{dt}. \quad (5.25)$$

Таким образом, можно написать следующее уравнение движения якоря электромагнита:

$$M \frac{d^2 \Delta x}{dt^2} + k_d \frac{d\Delta x}{dt} + (F_{\text{пр}} - F_{\text{с}}) = F_{\text{эл}} \pm F_{\text{трения}}. \quad (5.26)$$

В дальнейшем силой сухого трения пренебрегают. Тогда уравнение (5.26) для небольших отклонений от положения равновесия запишется следующим образом:

$$M \frac{d^2 \Delta x}{dt^2} + k_d \frac{d\Delta x}{dt} + \Delta F_{\text{м}} = \Delta F_{\text{эл}}. \quad (5.27)$$

Подставляя в уравнение (5.27) выражение для $\Delta F_{\text{м}}$ (5.16) и $\Delta F_{\text{эл}}$ (5.23), получают

$$M \frac{d^2 \Delta x}{dt^2} + k_d \frac{d\Delta x}{dt} + (k_{\text{м}} - k_s) \Delta x = k_s \Delta i_s. \quad (5.28)$$

— уравнение движения якоря электромагнита.

Таким образом, орган управления регулятора является колебательным звеном, процессы в котором описываются дифференциальным уравнением второго порядка.

Переходный процесс в обмотке электромагнита

Схема включения обмотки электромагнита изображена на фиг. 5.3, где w_s — обмотка электромагнита; r_{s0} — омическое сопротивление обмотки электромагнита; $r_s = r_{s0} + r_{\text{эл}}$ — сопротивление цепи электромагнита.

При стационарном процессе $i_{s0} r_s = U_0$. Если произошло нарушение состояния равновесия, то при переходном процессе

$$w_s \frac{d\Phi_s}{dt} + r_s i_s = U. \quad (5.29)$$

Величина магнитного потока Φ_s зависит от тока электромагнита i_s и величины воздушного зазора x , т. е.

$$\Phi_s = \Phi_s(i_s, x).$$

Тогда

$$w_{\text{в}} \frac{d\Phi_{\text{в}}}{dt} = w_{\text{в}} \left(\frac{\partial \Phi_{\text{в}}}{\partial i_{\text{в}}} \right)_{\substack{x=x_0 \\ i_{\text{в}}=i_{\text{в}0}}} \cdot \frac{di_{\text{в}}}{dt} + w_{\text{в}} \left(\frac{\partial \Phi_{\text{в}}}{\partial x} \right)_{\substack{x=x_0 \\ i_{\text{в}}=i_{\text{в}0}}} \frac{dx}{dt} \quad (5.30)$$

или

$$w_{\text{в}} \frac{d\Phi_{\text{в}}}{dt} = L_{\text{в}} \frac{di_{\text{в}}}{dt} + S \frac{dx}{dt}, \quad (5.31)$$

где $L_{\text{в}} = w_{\text{в}} \frac{\partial \Phi_{\text{в}}}{\partial i_{\text{в}}}$ и $S = w_{\text{в}} \frac{\partial \Phi_{\text{в}}}{\partial x}$ определяются графически, как тангенсы углов наклона касательных к кривым $\Phi_{\text{в}} = \Phi_{\text{в}}(i_{\text{в}})$ и $\Phi_{\text{в}} = \Phi_{\text{в}}(x)$.

Таким образом,

$$L_{\text{в}} \frac{d\Delta i_{\text{в}}}{dt} + r_{\text{в}} \Delta i_{\text{в}} = \Delta U - S \frac{d\Delta x}{dt}, \quad (5.32)$$

так как $i_{\text{в}0} r_{\text{в}} = U_0$.

Величина $S \frac{d\Delta x}{dt}$ характеризует собой величину электродвижущей силы, наводящейся в обмотке электромагнита при движении якоря.

Уравнение генератора

Переходные электрические процессы в генераторе описываются следующими уравнениями:

Для цепи возбуждения

$$w_{\text{в}} \frac{d\Phi_{\text{в}}}{dt} + i_{\text{в}}(r_{\text{в}} + r_{\text{с}}) = U, \quad (5.33)$$

где $\Phi_{\text{в}}$ — поток возбуждения;

$w_{\text{в}}$ — число витков обмотки возбуждения;

$r_{\text{в}}$ — сопротивление обмотки возбуждения;

$r_{\text{с}}$ — сопротивление угольного столба;

$i_{\text{в}}$ — ток возбуждения.

Так как $\Phi_{\text{в}} = \sigma \Phi_{\text{я}}$, где σ — коэффициент магнитного рассеяния, а $\Phi_{\text{я}}$ — магнитный поток якоря, то исходя из выражения для наведенной э. д. с. можно написать

$$w_{\text{в}} E = \frac{p}{a} \frac{n}{60} N \frac{\Phi_{\text{в}}}{\sigma} w_{\text{в}}. \quad (5.34)$$

Для цепи якоря, если пренебречь током возбуждения, протекающим по цепи якоря, и индуктивностью цепи якоря:

$$E = U + I_{\text{я}} R_{\text{я}} = U(1 + \alpha), \quad (5.35)$$

где

$$\alpha = \frac{I_{\text{я}} R_{\text{я}}}{U}. \quad (5.36)$$

Следовательно,

$$w_{\text{в}} U(1 + \alpha) = \frac{p}{a} \frac{n}{60} N \frac{\Phi_{\text{в}}}{\sigma} w_{\text{в}}. \quad (5.37)$$

Величина $\sigma(1 + \alpha) \frac{a}{p} \frac{60}{n} \frac{w_{\text{в}}}{N}$ имеет размерность времени. Поэтому ее называют коэффициентом времени возбуждения и обозначают буквой $T_{\text{в}}$, т. е.

$$T_{\text{в}} = \sigma(1 + \alpha) \frac{a}{p} \frac{60}{n} \frac{w_{\text{в}}}{N}. \quad (5.38)$$

Коэффициент времени возбуждения характеризует кинетические свойства возбуждения машины.

На основании (5.33) можно написать

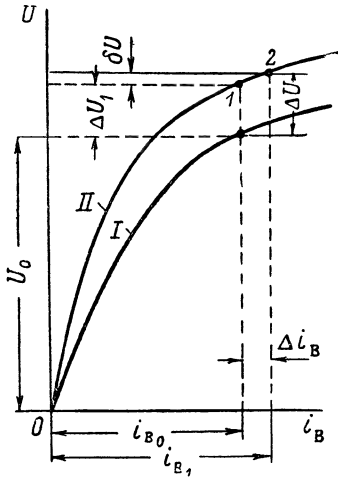
$$T_B \frac{dU}{dt} + i_B (r_B + r_{c1}) = U. \quad (5.39)$$

Процесс возбуждения машины характеризуется внешней характеристикой возбуждения, изображенной на фиг. 5.16. Характеристика возбуждения I (фиг. 5.16) соответствует заданному равновесному состоянию при $t \leq 0$:

$$n = \text{const} \text{ и } R_n = \text{const}.$$

Напряжение, на которое настроен регулятор, равно U_0 , а ток возбуждения при заданном равновесном состоянии i_{B0} , т. е.

$$U_0 = i_{B0} (r_B + r_{c0}). \quad (5.40)$$



Фиг. 5.16. Внешние характеристики возбуждения.

Если сопротивление нагрузки во внешней цепи генератора внезапно изменилось, то в результате этого изменятся падение напряжения в якоре генератора и реакция якоря.

Новому значению нагрузки генератора теперь будет отвечать и другая характеристика возбуждения (например, для сброса нагрузки кривая II , фиг. 5.16). В момент внезапного изменения сопротивления нагрузки напряжение на зажимах генератора изменится скачком на величину ΔU_1 , между тем как ток возбуждения в первое мгновение остается тем же самым (точка I).

Процесс изменения напряжения на зажимах генератора будет проходить дальше по кривой II .

Заменяя участок характеристики возбуждения II , в пределах которого происходит изменение напряжения, прямой, для текущей точки A можно написать

$$\delta U = k_u \Delta i_B = \Delta U - \Delta U_1, \quad (5.41)$$

где k_u — сопротивление, определяемое тангенсом угла наклона спрямленного участка характеристики возбуждения.

Отсюда

$$\Delta i_B = \frac{\Delta U - \Delta U_1}{k_u}. \quad (5.42)$$

Если перейти к отклонениям, то, учитывая, что

$$\Delta U = U_1 - U_0, \quad (5.43)$$

$$\Delta i_B = i_{B1} - i_{B0}, \quad (5.44)$$

$$\Delta r_c = r_{c1} - r_{c0}, \quad (5.45)$$

и, вычитая из (5.39) выражение (5.40), получают

$$T_B \frac{d\Delta U}{dt} + i_{B0} \Delta r_c + \Delta i_B (r_B + r_{c0} + \Delta r_c) = U_1 - U_0 \quad (5.46)$$

или

$$T_{\text{в}} \frac{d\Delta U}{dt} + \Delta i_{\text{в}} (r_{\text{в}} + r_{\text{с0}}) + \Delta i_{\text{в}} \Delta r_{\text{с}} + i_{\text{в0}} \Delta r_{\text{с}} = \Delta U. \quad (5.47)$$

Заменяя $\Delta i_{\text{в}}$ согласно (5.42) и пренебрегая величиной второго порядка малости: $\Delta i_{\text{в}} \Delta r_{\text{с}}$, получают

$$T_{\text{в}} \frac{d\Delta U}{dt} + \left(\frac{r_{\text{в}} + r_{\text{с0}}}{k_{\text{и}}} - 1 \right) \Delta U = -i_{\text{в0}} \Delta r_{\text{с}} + \frac{r_{\text{в}} + r_{\text{с0}}}{k_{\text{и}}} \Delta U_1. \quad (5.48)$$

Если предположить, что зависимость изменения сопротивления угольного столбика $r_{\text{с}}$ от перемещения x при условии малых отклонений имеет линейный характер, то

$$\Delta r_{\text{с}} = k'_{\text{с}} \Delta x. \quad (5.49)$$

При этом уравнение регулируемого объекта имеет вид

$$T_{\text{в}} \frac{d\Delta U}{dt} + \left(\frac{r_{\text{в}} + r_{\text{с0}}}{k_{\text{и}}} - 1 \right) \Delta U = \frac{r_{\text{в}} + r_{\text{с0}}}{k_{\text{и}}} \Delta U_1 - k_{\text{с}} \Delta x, \quad (5.50)$$

$$k_{\text{с}} = k'_{\text{с}} i_{\text{в0}}. \quad (5.51)$$

Уравнение процесса автоматического регулирования напряжения самолетного генератора с угольным регулятором

Таким образом, получена система трех линейных дифференциальных уравнений (5.28), (5.32) и (5.50) с тремя неизвестными: ΔU , Δx и $\Delta i_{\text{с}}$.

$$\left. \begin{aligned} M \frac{d^2 \Delta x}{dt^2} + k_{\text{д}} \frac{d\Delta x}{dt} + (k_{\text{м}} - k_{\text{б}}) \Delta x &= k_{\text{с}} \Delta i_{\text{с}}, \\ L_{\text{с}} \frac{d\Delta i_{\text{с}}}{dt} + r_{\text{с}} \Delta i_{\text{с}} &= \Delta U - S \frac{d\Delta x}{dt}, \\ T_{\text{в}} \frac{d\Delta U}{dt} + \left(\frac{r_{\text{в}} + r_{\text{с0}}}{k_{\text{и}}} - 1 \right) \Delta U &= -k_{\text{с}} \Delta x + \frac{r_{\text{в}} + r_{\text{с0}}}{k_{\text{и}}} \Delta U_1 \end{aligned} \right\} \quad (5.52)$$

или в операторной форме:

$$\left. \begin{aligned} [Mp^2 + k_{\text{д}}p + (k_{\text{м}} - k_{\text{б}})] \Delta x &= k_{\text{с}} \Delta i_{\text{с}}, \\ (L_{\text{с}}p + r_{\text{с}}) \Delta i_{\text{с}} &= \Delta U - Sp \Delta x, \\ \left[T_{\text{в}}p + \left(\frac{r_{\text{в}} + r_{\text{с0}}}{k_{\text{и}}} - 1 \right) \right] \Delta U &= -k_{\text{с}} \Delta x + \frac{r_{\text{в}} + r_{\text{с0}}}{k_{\text{и}}} \Delta U_1. \end{aligned} \right\} \quad (5.53)$$

Процесс стабилизации напряжения описывается уравнением

$$\begin{aligned} &\left\{ \left(T_{\text{в}}p + \frac{r_{\text{в}} + r_{\text{с0}}}{k_{\text{и}}} - 1 \right) [(L_{\text{с}}p + r_{\text{с}})(Mp^2 + k_{\text{д}}p + k_{\text{м}} - k_{\text{б}}) + Sk_{\text{с}}p] + k_{\text{с}}k_{\text{с}} \right\} \Delta U = \\ &= \frac{r_{\text{в}} + r_{\text{с0}}}{k_{\text{и}}} \{ (L_{\text{с}}p + r_{\text{с}}) [Mp^2 + k_{\text{д}}p + k_{\text{м}} - k_{\text{б}}] + Sk_{\text{с}}p \} \Delta U_1. \end{aligned} \quad (5.54)$$

Так как ранее предполагалось, что $\Delta U_1 = \text{const}$, то

$$\begin{aligned} &\{ (T_{\text{в}}p + S_{\text{в}}) [(L_{\text{с}}p + r_{\text{с}})(Mp^2 + k_{\text{д}}p + k_{\text{м}} - k_{\text{б}}) + Sk_{\text{с}}p] + k_{\text{с}}k_{\text{с}} \} \Delta U = \\ &= \frac{r_{\text{в}} + r_{\text{с0}}}{k_{\text{и}}} r_{\text{с}} (k_{\text{м}} - k_{\text{б}}) \Delta U_1. \end{aligned} \quad (5.55)$$

Характеристическое уравнение системы представляет собой полное уравнение четвертой степени:

$$\{ (T_{\text{в}}p + S_{\text{в}}) [(L_{\text{с}}p + r_{\text{с}})(Mp^2 + k_{\text{д}}p + k_{\text{м}} - k_{\text{б}}) + Sk_{\text{с}}p] + k_{\text{с}}k_{\text{с}} \} = 0$$

или

$$T_B L_9 M p^4 + (T_B L_9 k_d + S_B L_9 M + T_B r_9 M) p^3 + [k_d L_9 S_B + k_d T_B r_9 + S_B r_9 M + (k_m - k_0) T_B L_9 + T_B S k_9] p^2 + [(k_m - k_0) (S_B L_9 + T_B r_9) + S_B r_9 k_d + S_B S k_9] p + (k_m - k_0) S_B r_9 + k_c k_0 = 0, \quad (5.56)$$

где

$$S_B = \frac{r_B + r_{c0}}{k_u} - 1.$$

Экспериментальное исследование угольных регуляторов напряжения показывает, что переходные процессы в регуляторе напряжения, описываемые уравнениями (5.28) и (5.32), имеют аperiodический характер и что наибольшее влияние на процессы оказывает внутренняя обратная связь ($S p \Delta x$), обусловленная электродвижущей силой, появляющейся в обмотке электромагнита вследствие движения якоря. Эта обратная связь вносит весьма сильное демпфирование в систему.

При этом весь регулятор с достаточным приближением можно представить одним аperiodическим звеном, процессы в котором характеризуются уравнением

$$\Delta x = \frac{k_9 \Delta U}{(S k_9 + k_d r_9) p + r_9 (k_m - k_0)}. \quad (5.57)$$

Такое представление допустимо, так как обычно влияние массы угольного столбика M и индуктивности электромагнита L_9 на переходный процесс незначительно.

Уравнение стабилизации напряжения при сделанном допущении имеет вид

$$\begin{aligned} & \left\{ [(S k_9 + k_d r_9) p + r_9 (k_m - k_0)] \left(T_B p + \frac{r_B + r_{c0}}{k_u} - 1 \right) + k_9 k_c \right\} \Delta U = \\ & = \frac{r_B + r_{c0}}{k_u} [(S k_9 + k_d r_9) p + r_9 (k_m - k_0)] \Delta U_1, \end{aligned} \quad (5.58)$$

а характеристическое уравнение системы

$$[(S k_9 + k_d r_9) p + r_9 (k_m - k_0)] \left(T_B p + \frac{r_B + r_{c0}}{k_u} - 1 \right) + k_9 k_c = 0 \quad (5.59)$$

или

$$T_B T_p p^2 + [r_9 (k_m - k_0) T_B + T_p S_B] p + r_9 (k_m - k_0) S_B + k_9 k_c = 0, \quad (5.60)$$

где

$$T_p = S k_9 + k_d r_9, \quad (5.61)$$

а $S_B = \frac{r_B + r_{c0}}{k_u} - 1$ — коэффициент статической устойчивости возбуждения (см. § 3.5).

§ 5.5. ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА РЕГУЛИРОВАНИЯ И ТОЧНОСТИ РАБОТЫ РЕГУЛЯТОРА

Устойчивость является одним из основных требований, предъявляемых к процессу регулирования.

Процесс регулирования устойчив в том случае, если после изменения нагрузки напряжение генератора стремится к некоторому постоянному значению, т. е. при $t \rightarrow \infty U = \text{const}$.

В некоторых случаях процесс регулирования сопровождается нарастанием напряжения или нежелательным явлением автоколебаний с боль-

шим периодом колебаний. Процесс регулирования в этом случае не является устойчивым.

Процесс стабилизации напряжения симметричного генератора в общем случае описывается дифференциальным уравнением четвертой степени (уравнение (5.55)), характеристическое уравнение которого можно представить в следующем виде:

$$p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4 = 0. \quad (5.62)$$

Условием того, чтобы действительные части корней этого характеристического уравнения были отрицательными, являются следующие неравенства (условия устойчивости Гурвица):

$$a_1 > 0; \quad a_2 > 0; \quad a_3 > 0; \quad a_4 > 0. \quad (5.63)$$

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ 1 & a_2 \end{vmatrix} > 0$$

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_3 & 0 \\ 1 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} > 0 \quad (5.64)$$

Исследования показывают, что самым неблагоприятным в смысле устойчивости процесса регулирования является случай слабого насыщения машины (холостой ход генератора при максимальной скорости вращения). Поэтому на этот случай и следует проверять систему регулирования на устойчивость.

Постоянные коэффициенты, входящие в дифференциальное уравнение (5.55), меняются с изменением внешних условий. Так, например, величины r_b и k_b изменяются с изменением температуры, величина k_m зависит от затяжки пружины.

Так как скорость вращения самолетного генератора и его нагрузка изменяются в широких пределах, то в широких пределах изменяется и величина T_b .

Следовательно, как параметры объекта регулирования (самолетного генератора), так и параметры регулятора (угольного регулятора напряжения) не остаются постоянными с изменением режима работы и внешних условий. Поэтому регулятор следует рассчитывать и анализировать для крайних наиболее тяжелых режимов, а затем проверять его для промежуточных режимов.

Возможны два случая настройки регулятора. В первом случае имеет место астатический вид регулирования, во втором — статический.

а) Астатический вид регулирования. Астатическим процесс регулирования называется в том случае, если величина регулируемого параметра независимо от величины нагрузки поддерживается на строго постоянном уровне при всех стационарных режимах.

В частном случае при астатической настройке угольного регулятора при $t \rightarrow \infty \Delta U \rightarrow 0$.

Следовательно, правая часть уравнения (5.55) должна быть равна нулю, что возможно лишь при $k_m = k_b$. Равенство $k_m = k_b$ означает, что изменение механической силы пружины с увеличением зазора должно иметь тот же характер, какой имеет изменение силы притяжения электромагнита с увеличением зазора при постоянных ампервитках (производная от механической силы пружины по перемещению должна быть равна частной производной от силы электромагнитного притяжения по перемещению).

Таким образом, процесс стабилизации напряжения генератора с астатическим угольным регулятором описывается полным линейным диф-

ференциальным уравнением четвертого порядка, но без правой части для случая внезапного изменения нагрузки на постоянную величину.

Оценку устойчивости системы регулирования можно произвести на основе анализа характеристического уравнения при $k_m - k_i = 0$:

$$T_b L_s M p^4 + (T_b L_s k_d + S_b L_s M + T_b r_s M) p^3 + (k_d L_s S_b + k_d T_b r_s + S_b r_s M + T_b S k_s) p^2 + (S_b r_s k_d + S_b S k_s) p + k_s k_s = 0 \quad (5.65)$$

и применения критерия устойчивости Гурвица.

Для того чтобы процесс регулирования был устойчивым, прежде всего необходимо, чтобы коэффициенты уравнения были положительными.

Чем больше коэффициент при первой производной, тем больше затухание в системе и тем более устойчив процесс регулирования. Если $S_b(r_s k_d + k_s S) = 0$, то дифференциальное уравнение будет иметь также четвертый порядок, но коэффициент при первой производной будет равен нулю.

Из критерия устойчивости Гурвица вытекает, что если в линейном дифференциальном уравнении четвертого порядка отсутствует член с первой производной, то процесс, описываемый этим уравнением, неустойчив, т. е. при $t \rightarrow \infty$ решение уравнения стремится к бесконечности.

В действительности коэффициент при первой производной всегда отличен от нуля, однако если не применять специальных мер для его увеличения, то он невелик. Поэтому в случае астатической настройки регулятора процесс регулирования без специальных мер мало устойчив. Это заставляет прибегать к искусственным мероприятиям, которые позволяют повысить устойчивость процесса регулирования.

Устойчивость процесса регулирования достигается специальными электрическими методами, которые изложены ниже.

б) Статический вид регулирования. Статическим процесс регулирования называется в том случае, если установившееся значение регулируемого параметра зависит от величины нагрузки, меняясь в небольших пределах с ее изменением.

В случае статической настройки регулятора напряжение генератора будет немного повышаться или понижаться с увеличением нагрузки генератора, т. е. при $t \rightarrow \infty \Delta U \rightarrow \text{const}$.

При статической настройке регулятора

$$k_m - k_i \neq 0. \quad (5.66)$$

Очевидно, что чем больше величина $(k_m - k_i)$ отличается от нуля, тем больше величина регулируемого напряжения генератора зависит от нагрузки, т. е. тем больше статизм системы. Если $k_m - k_i > 0$, то напряжение генератора падает с увеличением нагрузки; если $k_m - k_i < 0$, то напряжение генератора повышается с увеличением нагрузки.

В случае когда с увеличением нагрузки напряжение генератора повышается, регулятор обладает компаундирующим свойством. Компаундирующие свойства регулятора напряжения самолетных генераторов нежелательны, особенно когда генераторы работают параллельно, так как при этом не обеспечивается правильное распределение нагрузки. Кроме того, при компаундировании величина $(k_m - k_i)$ становится отрицательной, что ухудшает условия устойчивости работы системы.

Поэтому в большинстве случаев угольный регулятор напряжения выполняют так, чтобы процесс регулирования был статическим, но $k_m - k_i > 0$.

При установившемся режиме

$$\Delta U = \frac{r_B + r_{c0}}{k_u} \frac{r_3 (k_M - k_\delta)}{S_B r_3 (k_M - k_\delta) + k_c k_3} \Delta U_1. \quad (5.67)$$

Следовательно, увеличения точности работы регулятора можно достигнуть при статической настройке только увеличением коэффициентов k_c и k_3 , что в свою очередь ведет к понижению устойчивости системы.

§ 5.6. МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА РЕГУЛИРОВАНИЯ С УГОЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ

Для повышения устойчивости процесса регулирования напряжения с помощью угольного регулятора применяют ряд электрических методов, так как введение механического демпфирования вследствие весьма малых перемещений подвижных частей регулятора не приводит к желаемому результату.

а) Повышение устойчивости с помощью жесткой обратной связи. Современные угольные регуляторы напряжения снабжаются специальными стабилизирующими сопротивлениями для повышения устойчивости процесса регулирования. По существу стабилизирующее сопротивление представляет собой так называемое сопротивление обратной связи.

На фиг. 5.17 изображена схема включения такого стабилизирующего сопротивления в схему угольного регулятора.

На фиг. 5.17 r_{30} — сопротивление обмотки электромагнита; $r_{3,д}$ — добавочное сопротивление в цепи обмотки электромагнита; $r_{ст}$ — стабилизирующее сопротивление.

Ток, проходящий через обмотку электромагнита, может быть найден из уравнений

$$U = L_3 \frac{di_3}{dt} + S \frac{dx}{dt} + i_3 r_{30} + i_3'' r_{ст} + (i_B + i_3'') r_c, \quad (5.68)$$

где

$$i_3 = i_3' + i_3''; \quad (5.69)$$

$$i_3'' r_c + i_B r_c + i_3'' r_{ст} = i_3' r_{3,д}. \quad (5.70)$$

Так как

$$i_3'' \ll i_B, \quad (5.71)$$

то

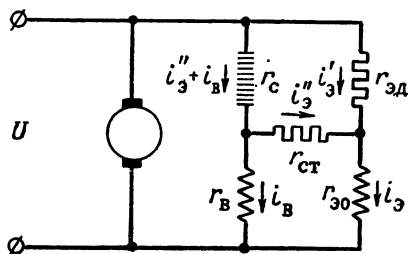
$$i_B r_c + i_3'' r_{ст} \approx i_3' r_{3,д}. \quad (5.72)$$

Прибавляя к левой и правой частям последнего равенства величину $i_3'' r_{3,д}$, получают

$$i_B r_c + i_3'' (r_{ст} + r_{3,д}) = (i_3' + i_3'') r_{3,д}. \quad (5.73)$$

Принимая во внимание выражение (5.69), имеют

$$i_3'' = \frac{r_{3,д} i_3' - r_c i_B}{r_{ст} + r_{3,д}}. \quad (5.74)$$



Фиг. 5.17. Схема включения угольного регулятора напряжения со стабилизирующим сопротивлением.

Подставляя найденное выражение для i_9'' в уравнение (5.68) [учитывая условие (5.71)], находят

$$L_9 \frac{di_9}{dt} + S \frac{dx}{dt} + i_9 \left(r_{90} + \frac{r_{ст} r_{э.д}}{r_{ст} + r_{э.д}} \right) = U - i_9 r_c \left[1 - \frac{r_{ст}}{r_{ст} + r_{э.д}} \right]; \quad (5.75)$$

$$L_9 \frac{di_9}{dt} + i_9 \left(r_{90} + \frac{r_{ст} r_{э.д}}{r_{ст} + r_{э.д}} \right) = U - i_9 r_c \frac{r_{э.д}}{r_{ст} + r_{э.д}} - S \frac{dx}{dt}. \quad (5.76)$$

Для установившегося режима ($t \rightarrow \infty$)

$$i_9 \left(r_{90} + \frac{r_{ст} r_{э.д}}{r_{ст} + r_{э.д}} \right) = U - i_9 r_c \frac{r_{э.д}}{r_{ст} + r_{э.д}}. \quad (5.77)$$

Из последнего выражения следует, что ток в обмотке электромагнита зависит не только от напряжения U , но и от падения напряжения на угольном столбике. Таким образом, при наличии стабилизирующего сопротивления процесс регулирования всегда является статическим процессом регулирования.

Если напряжение должно поддерживаться на строго постоянном уровне, то установившееся значение тока i_9 не должно зависеть от падения напряжения на угольном столбике $i_9 r_c$.

Введение добавочного сопротивления $r_{ст}$ повышает устойчивость процесса регулирования. Это видно из следующих соображений. Уравнение, описывающее переходный процесс в цепи обмотки электромагнита, при наличии сопротивления $r_{ст}$ для приращения переменных имеет вид

$$L_9 \frac{d\Delta i_9}{dt} + \left(r_{90} + \frac{r_{ст} r_{э.д}}{r_{ст} + r_{э.д}} \right) \Delta i_9 = \Delta U - \frac{r_{ст} r_{э.д}}{r_{э.д} + r_{ст}} \Delta i_9 - \frac{k_c r_{э.д}}{r_{э.д} + r_{ст}} \Delta x - S \frac{d\Delta x}{dt}, \quad (5.78)$$

а общее уравнение стабилизации напряжения в схеме угольного регулятора с жесткой обратной связью можно получить, исключая из уравнений (5.78), (5.28), (5.42) и (5.50) Δi_9 , Δx и Δi_9 :

$$\begin{aligned} & \left\{ T_B L_9 M p^4 + \left[T_B L_9 k_d + S_B L_9 M + T_B M \left(r_{90} + \frac{r_{ст} r_{э.д}}{r_{э.д} + r_{ст}} \right) \right] p^3 + \right. \\ & + \left[(k_m - k_\delta) T_B L_9 + k_d S_B L_9 + T_B k_d \left(r_{90} + \frac{r_{ст} r_{э.д}}{r_{э.д} + r_{ст}} \right) + S_B M \left(r_{90} + \frac{r_{ст} r_{э.д}}{r_{э.д} + r_{ст}} \right) + \right. \\ & + k_9 T_B S \left. \right] p^2 + \left[S_B L_9 (k_m - k_\delta) + T_B (k_m - k_\delta) \left(r_{90} + \frac{r_{ст} r_{э.д}}{r_{э.д} + r_{ст}} \right) + \right. \\ & + S_B k_d \left(r_{90} + \frac{r_{ст} r_{э.д}}{r_{э.д} + r_{ст}} \right) + \frac{k_9 k_c r_{э.д}}{r_{э.д} + r_{ст}} T_B + k_9 S S_B \left. \right] p + S_B \left(r_{90} + \frac{r_{ст} r_{э.д}}{r_{э.д} + r_{ст}} \right) \times \\ & \times (k_m - k_\delta) + \frac{k_9 k_c r_{э.д}}{r_{э.д} + r_{ст}} S_B + k_c k_9 \left[1 - \frac{r_{ст} r_{э.д}}{(r_{э.д} + r_{ст}) k_u} \right] \left. \right\} \Delta U = \\ & = \frac{r_B + r_{с0}}{k_u} \left[\left(r_{90} + \frac{r_{ст} r_{э.д}}{r_{э.д} + r_{ст}} \right) (k_m - k_\delta) + \right. \\ & \left. + k_c k_9 \frac{r_B r_{э.д}}{(r_B + r_{с0})(r_{э.д} + r_{ст})} \right] \Delta U_1. \quad (5.79) \end{aligned}$$

Сравнивая полученное уравнение с уравнением (5.65), можно видеть, как изменились выражения, стоящие множителями при первой

производной и свободном члене: первое увеличилось на $\frac{k_c k_{\Sigma}}{r_{\Sigma, д} + r_{ст}} r_{\Sigma, д} T_{\Sigma}$, второе изменилось на $\frac{k_c k_{\Sigma}}{r_{\Sigma, д} + r_{ст}} r_{\Sigma, д} \left[\frac{r_{\Sigma}}{k_u} - 1 \right]$.

Увеличение коэффициента при первой производной благоприятно с точки зрения повышения устойчивости процесса.

Увеличение свободного члена ведет к возрастанию скородействия системы, однако при этом процесс становится менее устойчивым.

При установившемся режиме

$$\Delta U = \frac{\frac{r_{\Sigma} + r_{с0}}{k_u} \left[\left(r_{\Sigma 0} + \frac{r_{ст} r_{\Sigma, д}}{r_{\Sigma, д} + r_{ст}} \right) (k_m - k_{\delta}) + k_c k_{\Sigma} \frac{r_{\Sigma} r_{\Sigma, д}}{(r_{\Sigma} + r_{с0})(r_{\Sigma, д} + r_{ст})} \right] \Delta U_1}{S_{\Sigma} \left(r_{\Sigma 0} + \frac{r_{\Sigma, д}}{r_{\Sigma, д} + r_{ст}} \right) (k_m - k_{\delta}) + \frac{k_c k_{\Sigma} r_{\Sigma, д}}{r_{\Sigma, д} + r_{ст}} S_{\Sigma} + k_c k_{\Sigma} \left[1 - \frac{r_{с0} r_{\Sigma, д}}{(r_{\Sigma, д} + r_{ст}) k_u} \right]}. \quad (5.80)$$

Даже при астатической настройке регулятора, т. е. при $k_m = k_{\delta}$,

$$\Delta U = \frac{r_{\Sigma} r_{\Sigma, д}}{r_{\Sigma} r_{\Sigma, д} + k_u r_{ст}} \Delta U_1, \quad (5.81)$$

имеет место статическая ошибка, тем большая, чем меньше $r_{ст}$, т. е. чем сильнее обратная связь. В системе с жесткой обратной связью всегда имеет место статический процесс регулирования.

б) Повышение устойчивости с помощью стабилизирующего трансформатора. Для увеличения устойчивости процесса регулирования в схемах регуляторов напряжения используются стабилизирующие трансформаторы, присоединяемые или на зажимы генератора, как указано на фиг. 5.18, или параллельно обмотке возбуждения (фиг. 5.19).

В схеме фиг. 5.18 первичная цепь трансформатора присоединяется к зажимам генератора, а вторичная обмотка его вводится последовательно с цепью электромагнита регулятора.

Стабилизирующий трансформатор выполняется с большим числом витков первичной обмотки и малым числом вторичной обмотки. Например, $\omega_1 = 3180$, $r_1 = 320$ ом; $\omega_2 = 200$, $r_2 = 0,47$ ом.

Так как число вторичных витков трансформатора невелико и токи в цепи электромагнита малы, то эту систему можно рассматривать как трансформатор напряжения и влиянием размагничивающего действия вторичных витков пренебречь:

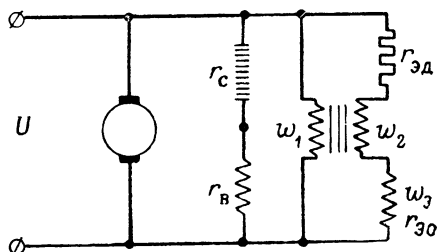
$$M_T \frac{di_{\Sigma}}{dt} \ll L_{T1} \frac{di_{T1}}{dt}.$$

При таком допущении электрические процессы в первичной цепи трансформатора можно описать следующим уравнением:

$$U = i_{T1} r_{T1} + L_{T1} \frac{di_{T1}}{dt}, \quad (5.82)$$

где r_{T1} — сопротивление первичной обмотки трансформатора;

L_{T1} — индуктивность первичной обмотки трансформатора.



Фиг. 5.18. Схема включения угольного регулятора напряжения со стабилизирующим трансформатором, присоединенным к зажимам генератора.

Постоянные составляющие ампервитков обмоток трансформатора направлены встречно и размагничивают друг друга, однако во избежание насыщения железа магнитопровод его имеет воздушный зазор, образованный стыками пластин железа.

При введении вторичной обмотки стабилизирующего трансформатора в цепь электромагнита электрические процессы представляются теперь в следующем виде:

$$M_T \frac{di_{T1}}{dt} + U = L_9 \frac{di_9}{dt} + L_{T2} \frac{di_9}{dt} + S \frac{dx}{dt} + i_9 r_9, \quad (5.83)$$

где L_9 — индуктивность обмотки электромагнита:

$$r_9 = r_{90} + r_{9, \text{д}}$$

а M_T — коэффициент взаимной индукции между обмотками.

Параметры первичной цепи стабилизирующего трансформатора обычно подбираются так, что в процессе регулирования

$$i_{T1} r_{T1} \gg L_{T1} \frac{di_{T1}}{dt}. \quad (5.84)$$

Отсюда следует

$$U \approx i_{T1} r_{T1} \quad (5.85)$$

и

$$M_T \frac{di_{T1}}{dt} = \frac{M_T}{r_{T1}} \frac{dU}{dt}. \quad (5.86)$$

На основании этого ток в цепи электромагнита изменяется согласно уравнению

$$(L_9 + L_{T2}) \frac{di_9}{dt} + r_9 i_9 = U + \frac{M_T}{r_{T1}} \frac{dU}{dt} - S \frac{dx}{dt}. \quad (5.87)$$

Таким образом, благодаря наличию стабилизирующего трансформатора на цепь обмотки электромагнита регулятора действует не только напряжение на зажимах генератора, но и скорость изменения этого напряжения, т. е. осуществляется дополнительное воздействие по первой производной от напряжения U .

В целом процесс стабилизации напряжения посредством угольного регулятора напряжения в схеме со стабилизирующим трансформатором, включенным по схеме фиг. 5.18, описывается уравнениями (5.28), (5.50) и (5.87).

С помощью стабилизирующего трансформатора удастся значительно повысить устойчивость процесса регулирования. К недостаткам этого метода повышения устойчивости следует отнести увеличение продолжительности протекания переходных процессов, т. е. уменьшение быстродействия системы.

При включении стабилизирующего трансформатора согласно схеме фиг. 5.19 для первичной цепи трансформатора можно написать

$$U - i_B r_c = i_{T1} r_{T1} + L_{T1} \frac{di_{T1}}{dt}. \quad (5.88)$$

Если

$$i_{T1} r_{T1} \gg L_{T1} \frac{di_{T1}}{dt},$$

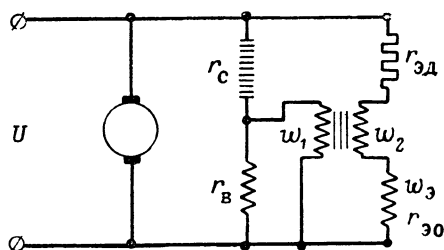
то для цепи электромагнита уравнение, характеризующее переходные процессы, примет вид

$$(L_9 + L_{T2}) \frac{di_9}{dt} + r_9 i_9 = U + \frac{M_T}{r_{T1}} \frac{dU}{dt} - \frac{M_T}{r_{T1}} r_c \frac{di_B}{dt} - \frac{M_T}{r_{T1}} i_B \frac{dr_c}{dt}. \quad (5.89)$$

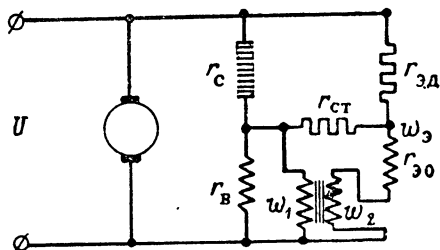
Таким образом, в данной схеме ток электромагнита зависит не только от напряжения и первой производной по напряжению, но также и от скорости изменения i_b и r_a .

Процесс стабилизации напряжения в рассматриваемой схеме описывается тремя уравнениями: (5.28), (5.50) и (5.89).

Существенным недостатком этой схемы является замедление процессов стабилизации в переходных режимах. С этим следует считаться особенно при использовании генераторов больших мощностей, обладающих большим коэффициентом времени возбуждения. При работе таких генераторов возможны случаи также и значительного перерегулирования, т. е. когда напряжение в течение длительного промежутка времени может превышать номинальное значение напряжения генератора, что в свою очередь может привести к выходу из строя ряда потребителей — чаще всего ламп накаливания.



Фиг. 5.19. Схема включения угольного регулятора напряжения со стабилизирующим трансформатором, присоединенным к зажимам обмотки возбуждения генератора.



Фиг. 5.20. Схема включения угольного регулятора напряжения со стабилизирующим трансформатором и стабилизирующим сопротивлением.

Используемые в настоящее время угольные регуляторы напряжения обычно включаются по схеме, изображенной на фиг. 5.20, т. е. в системе осуществляется как жесткая, так и гибкая обратные связи.

Благодаря наличию жесткой обратной связи за счет включения стабилизирующего сопротивления удается несколько ускорить процесс стабилизации при сохранении достаточной устойчивости и тем самым устранить основной недостаток схем со стабилизирующим трансформатором.

С другой стороны, путем использования гибкой обратной связи имеется возможность несколько ослабить жесткую обратную связь (при сохранении того же запаса устойчивости) и тем самым уменьшить статизм системы, т. е. увеличить точность регулирования.

§ 5.7. УСТАНОВКА НА САМОЛЕТЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ УГОЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПЯЖЕНИЯ

В большинстве случаев угольный регулятор напряжения представляет собой самостоятельный прибор, конструктивно не связанный с аппаратурой защиты от обратных токов и перегрузок.

Это обстоятельство позволяет располагать регуляторы напряжения в любом месте самолета, руководствуясь удобством обслуживания, в то же время не удлиняя провода силовой цепи.

В ряде случаев регуляторы напряжения могут устанавливаться вне герметических кабин, однако при этом регулировочные сопротивления устанавливаются в местах, к которым имеется доступ в полете, для того чтобы иметь возможность производить подстройку регулятора в воздухе.

Это особенно важно потому, что на таких самолетах обычно применяется параллельная работа нескольких генераторов на общую сеть.

При выборе места для монтажа регулятора напряжения стремятся предохранить его от попадания воды и масла, от влияния вибраций и ускорений самолета, а также от дополнительного нагревания регулятора другими агрегатами.

Чтобы уменьшить влияние вибрации самолета на работу регуляторов напряжения, их монтируют на специальных амортизаторах.

Панель с амортизаторами регулятора устанавливается параллельно горизонтальной плоскости самолета, так, что ось угольного столбика занимает горизонтальное положение и перпендикулярна вертикальной оси самолета. Этим исключается влияние собственного веса столбика на работу регулятора, а якорю электромагнита регулятора сообщаются меньшие толчки, возникающие во время пробега и посадки самолета.

Как было уже указано, настройка регулятора напряжения может осуществляться тремя способами.

Настройка регулятора с помощью изменения воздушного зазора магнитопровода или изменения давления на угольный столбик допускается только в стационарных мастерских при наличии специальных регулировочных стендов.

Для нормальной работы электрооборудования самолета и для предотвращения преждевременного выхода из строя регулятора напряжения необходимо периодически проверять регулятор на отсутствие вибрации якоря. Для этого следует отключить провод, идущий от регулятора к стабилизирующему трансформатору, и присоединить параллельно угольному столбику через конденсатор емкостью 0,5—1,0 мкф головные телефоны.

При проверке аккумуляторную батарею отключают от бортовой сети, а генератор заставляют работать при 50-процентной нагрузке и максимальной скорости вращения.

Если регулятор работает устойчиво, то в момент включения и выключения нагрузки в телефонах прослушиваются одиночные щелчки. Если же после выключения нагрузки прослушивается непрерывный треск или серия затухающих щелчков, то регулятор работает неустойчиво. Такой регулятор непригоден для дальнейшей работы, и его необходимо снять с самолета.

Глава VI

СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПОСРЕДСТВОМ РЕГУЛЯТОРОВ ВИБРАЦИОННОГО ТИПА

Впервые вибрационные регуляторы для стабилизации напряжения были применены в электрических машинах в начале нынешнего столетия. Первоначально они использовались наряду с реостатными регуляторами для регулирования напряжения крупных машин, а затем стали широко применяться для регулирования напряжения авиационных, автомобильных и тракторных генераторов.

Особенностью устройства вибрационных регуляторов является наличие контактов, посредством которых производится периодическое мгновенное изменение параметров цепей возбуждения машины. Для регулирования напряжения авиационных генераторов мощностью свыше 1,5 кВт в большинстве случаев используются угольные регуляторы напряжения, однако для генераторов мощностью до 1,5 кВт вибрационные регуляторы применяются и до настоящего времени.

Кроме того, вибрационные регуляторы напряжения можно использовать в качестве регуляторов напряжения для возбудителей самолетных синхронных генераторов.

Теория вибрационных регуляторов рассмотрена в трудах В. С. Кулебакина, К. С. Бобова и др.

В. С. Кулебакиным была разработана теория задержек в срабатывании реле регулятора. При этом впервые была установлена важность задержек для возникновения процесса автоколебаний в системе регулирования и выведена зависимость частоты и амплитуды колебаний напряжения от параметров машины и регулятора.

К. С. Бобов исследовал схемы включения вибрационных регуляторов и разработал теорию параллельной работы самолетных генераторов, снабженных вибрационными регуляторами.

§ 6.1. ОБЩАЯ ТЕОРИЯ СТАТИКИ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВИБРИРУЮЩИХ КОНТАКТОВ

Простейшие схемы вибрационных регуляторов напряжения изображены на фиг. 4.1 и 4.2. В первом случае вибрирующие контакты регулятора шунтируют добавочное сопротивление r_d , включенное последовательно с обмоткой возбуждения генератора, а во втором случае — непосредственно обмотку возбуждения.

Если шунтирующие контакты привести каким-либо принудительным образом в состояние вибрации с постоянной частотой, то в цепи возбуждения устанавливается пульсирующий ток с некоторым средним постоянным значением, зависящим от соотношения между временами замкнутого и разомкнутого состояния контактов.

Пульсации тока в цепи возбуждения вызывают изменения э. д. с. и напряжения на зажимах генератора.

Процесс изменения напряжения по времени при вибрации контактов с постоянной частотой изображен на фиг. 6. 1. Здесь t_3 — время замкнутого состояния контактов, t_p — время разомкнутого состояния контактов и $t_b = t_3 + t_p$ — период вибрации контактов.

Среднее значение напряжения на зажимах генератора при заданной постоянной скорости вращения и нагрузке определяется средним значением тока возбуждения, которое, как это будет доказано ниже, получается равным

$$i_{в. ср} = \frac{U_{ср}}{r_b + r_d \tau_p}$$

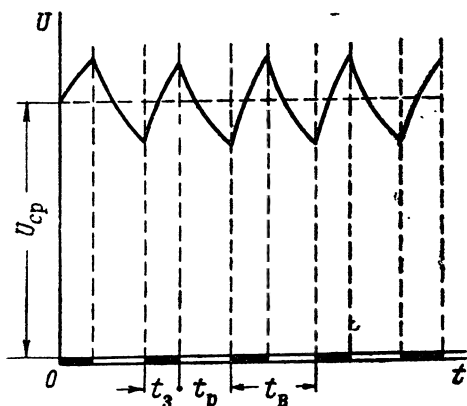
в том случае, когда контакты присоединены параллельно добавочному сопротивлению r_d и $i_{в. ср} = \frac{U_{ср}}{r_d + \frac{r_b}{\tau_p}}$, когда контакты регулятора

шунтируют обмотку возбуждения.

Здесь $\tau_p = \frac{t_p}{t_3 + t_p}$ — относительная разомкнутость контактов;

$\tau_3 = \frac{t_3}{t_3 + t_p}$ — относительная замкнутость контактов.

При включении вибрирующих контактов по схеме фиг. 4. 1 с увеличением относительной замкнутости контактов от 0, когда контакты все



Фиг. 6. 1. Изменение напряжения по времени при вибрации контактов с постоянной частотой.

время разомкнуты, до 1, когда они все время замкнуты, ток в цепи возбуждения возрастает. Если же контакты присоединены параллельно обмотке возбуждения (см. фиг. 4. 2), то увеличение относительной замкнутости вибрирующих контактов ведет к уменьшению тока возбуждения. Во время замкнутого состояния происходит нарастание тока в цепи возбуждения и, следовательно, повышение напряжения, если контакты присоединены по схеме фиг. 4. 1, и, наоборот, наступает уменьшение тока возбуждения и снижение напряжения в случае применения схемы фиг. 4. 2. При размыкании контактов происходят явления об-

ратного порядка. Таким образом, изменяя относительную замкнутость вибрирующих контактов, можно устанавливать различные средние значения тока возбуждения и тем самым поддерживать среднее значение напряжения на определенном уровне или изменять его по определенному закону.

Для поддержания постоянства напряжения на зажимах авиационных генераторов при различных скоростях вращения и нагрузках приходится регулировать ток возбуждения в довольно широком диапазоне, при котором кратность регулирования тока возбуждения может достигать

$$k_i = \frac{i_{в. max}}{i_{в. min}} = 6 \div 8.$$

Описанные процессы можно иллюстрировать диаграммой, изображенной на фиг. 6. 2, где нанесены предельные внешние характеристики возбуждения для режимов работы при $R_n = \infty$, $I_a = 0$ и $n = n_{\max}$ и при $R_n = R_{n \min}$, т. е. при U_{cp} , $I_a = I_{a \max}$ и $n = n_{\min}$.

Из фиг. 6. 2 следует, что для поддержания постоянства значения U_{cp} внутри указанных предельных режимов работы ток возбуждения необходимо изменять в пределах от $i_{в \max}$ до $i_{в \min}$. С другой стороны, при каком-либо постоянном режиме работы, при пульсациях напряжения от $U_{cp} - \delta U$ до $U_{cp} + \delta U$, ток возбуждения изменяется на величину $\delta i_{в}$ от $i_{в \text{ ср}}$, достигая своего среднего значения при $U = U_{cp}$.

Само собой понятно, что каждому другому режиму работы соответствуют свои средние значения тока возбуждения.

При стационарном режиме для достижения током возбуждения некоторого среднего значения $i_{в \text{ ср}}$, необходимого для получения напряжения U_{cp} , потребовалось бы сопротивление цепи возбуждения $R_{в} = \frac{U_{cp}}{i_{в \text{ ср}}}$, которое можно бы-

ло бы для схемы фиг. 4. 1 представить в виде $R_{в} = r_{в} + r_{д. \text{эфф}}$, а для схемы фиг. 4. 2 $R_{в} = r_{д} + r_{в. \text{эфф}}$. Иначе при вибрирующих контактах под $r_{д. \text{эфф}}$ и $r_{в. \text{эфф}}$ следует подразумевать тот эффект, который оказывает на цепь тока возбуждения процесс вибрации контактов и в результате которого ток возбуждения приобретает значение $i_{в \text{ ср}}$, соответствующее напряжению U_{cp} .

Из сказанного следует, что эффективные сопротивления для схем, изображенных на фиг. 4. 1 и 4. 2, могут быть выражены соответственно:

$$r_{д. \text{эфф}} = \frac{U_{cp}}{i_{в \text{ ср}}} - r_{в} = R_{в} - r_{в}$$

и

$$r_{в. \text{эфф}} = \frac{U_{cp}}{i_{в \text{ ср}}} - r_{д} = R_{в} - r_{д}$$

Для того чтобы выразить значения $r_{д. \text{эфф}}$ и $r_{в. \text{эфф}}$ через параметры, характеризующие процесс вибрации контактов, каковыми являются относительные замкнутость τ_z и разомкнутость τ_r контактов, необходимо составить уравнения, описывающие процесс возбуждения генератора.

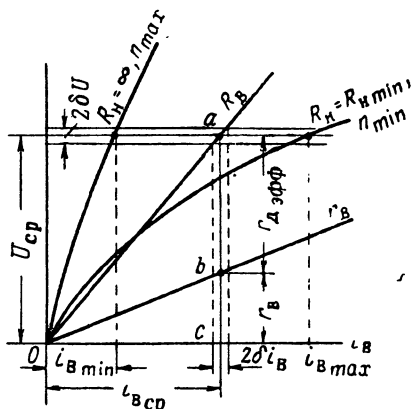
Для схемы фиг. 4. 1 при установившихся автоколебаниях электрические процессы в моменты времени перехода напряжения через средние значения U_{cp} , при нарастании напряжения в период замкнутого состояния контактов и спадании его в период разомкнутого состояния последних, описываются следующим образом:

Для замкнутого состояния контактов

$$U_{cp} = i_{в. \text{ ср}} r_{в} + i_{в. \text{ ср}} r'_{д} + w_{в} \left(\frac{d\Phi_{в}}{dt} \right)_3, \quad (6. 1)$$

где $w_{в}$ — число витков обмотки возбуждения;

$\left(\frac{d\Phi_{в}}{dt} \right)_3$ — скорость нарастания потока возбуждения в рассматриваемый



Фиг. 6. 2. Предельные внешние характеристики возбуждения.

момент, а $r'_д = \frac{r_д r_к}{r_д + r_к}$ — эквивалентное сопротивление двух параллельных ветвей: добавочного сопротивления и цепи контактов, причем в данном случае, ради общности исследования учитывается, что в действительности переходное сопротивление контактов не равно нулю, а имеет какое-то хотя и малое сопротивление $r_к$, которым при приближенных расчетах обычно пренебрегают.

Для разомкнутого состояния контактов

$$U_{ср} = i_{в. ср} r_в + i_{в. ср} r'_д + w_в \left(\frac{d\Phi_в}{dt} \right)_p, \quad (6.2)$$

где $\left(\frac{d\Phi_в}{dt} \right)_p$ — скорость спадания потока возбуждения в рассматриваемый момент.

Вводя коэффициент времени возбуждения (см. гл. V, стр. 109).

$$T_в = \sigma (1 + \alpha) \frac{a}{p} \frac{60}{n} \frac{w_в}{N},$$

характеризующий скорость изменения потока возбуждения или напряжения машины, можно написать, что

$$w_в \frac{d\Phi_в}{dt} = T_в \frac{dU}{dt},$$

а отсюда следует [см. формулы (6.1), (6.2)]:

$$\left. \begin{aligned} T_в \left(\frac{dU}{dt} \right)_{ср. з} &= U_{ср} - i_{в. ср} (r_в + r'_д); \\ T_в \left(\frac{dU}{dt} \right)_{ср. п} &= U_{ср} - i_{в. ср} (r_в + r_д), \end{aligned} \right\} \quad (6.3)$$

где $\left(\frac{dU}{dt} \right)_{ср. з}$ и $\left(\frac{dU}{dt} \right)_{ср. п}$ являются соответственно скоростями изменения напряжения при замкнутом и разомкнутом состояниях контактов в моменты времени прохождения напряжением через среднее значение $U_{ср}$.

В случае рассматриваемой схемы соединений $\left(\frac{dU}{dt} \right)_{ср. з}$ есть скорость нарастания напряжения, а $\left(\frac{dU}{dt} \right)_{ср. п}$ — скорость спадания напряжения. Скорость нарастания напряжения $\left(\frac{dU}{dt} \right)_{ср. з}$ положительна, скорость спадания напряжения $\left(\frac{dU}{dt} \right)_{ср. п}$ отрицательна.

Если ввести обозначения

$$U_{ср} - i_{в. ср} (r_в + r'_д) = \Delta U_з,$$

$$i_{в. ср} (r_в + r_д) - U_{ср} = \Delta U_п,$$

то можно написать

$$\left(\frac{dU}{dt} \right)_{ср. з} = \frac{\Delta U_з}{T_в}.$$

$$\left(\frac{dU}{dt} \right)_{ср. п} = -\frac{\Delta U_п}{T_в}.$$

Так как $\frac{U_{\text{ср}}}{i_{\text{в. ср}}} = R_{\text{в}} = r_{\text{в}} + r_{\text{д. эфф}}$, то отсюда следует, что

$$r_{\text{д. эфф}} = \tau_{\text{р}} r_{\text{д}} + r'_{\text{д}} \tau_{\text{з}}.$$

В частном случае, когда, как это обычно принято считать, $r_{\text{к}}=0$, то

$$r_{\text{д. эфф}} = r_{\text{д}} \tau_{\text{р}}. \quad (6.4)$$

Эффективное значение добавочного сопротивления в цепи возбуждения при шунтировании вибрирующими контактами добавочного сопротивления $r_{\text{д}}$, включенного последовательно с обмоткой возбуждения, равно произведению этого добавочного сопротивления и относительной разомкнутости контактов регулятора. Таким образом, регулированием $\tau_{\text{р}}$ можно изменять $r_{\text{д. эфф}}$ и, следовательно, ток в цепи возбуждения.

О том, как должны изменяться значения $\tau_{\text{з}}$ и $\tau_{\text{р}}$ для поддержания постоянства среднего напряжения в зависимости от изменений режима работы генератора, можно составить представление на основании диаграммы, изображенной на фиг. 6.3, где нанесены предельные характеристики возбуждения генератора и проведена горизонталь, соответствующая напряжению $U_{\text{ср}}$, и лучи сопротивления $r_{\text{в}} + r'_{\text{д}}$ и $r_{\text{в}} + r_{\text{д}}$.

Согласно предыдущим выводам, получается: для замкнутого состояния контактов

$$U_{\text{ср}} = i_{\text{в. ср}} (r_{\text{в}} + r'_{\text{д}}) + \Delta U_{\text{з}} = i_{\text{в. ср}} (r_{\text{в}} + r'_{\text{д}}) + T_{\text{в}} \left(\frac{dU}{dt} \right)_{\text{ср. з}} \quad (6.5)$$

и для разомкнутого состояния контактов

$$U_{\text{ср}} = i_{\text{в. ср}} (r_{\text{в}} + r_{\text{д}}) - \Delta U_{\text{р}} = i_{\text{в. ср}} (r_{\text{в}} + r_{\text{д}}) + T_{\text{в}} \left(\frac{dU}{dt} \right)_{\text{ср. р}}. \quad (6.6)$$

Эти уравнения справедливы для всех точек горизонтали, проведенной через $U_{\text{ср}}$, лежащих на участке между $i_{\text{в. min}}$ и $i_{\text{в. max}}$.

Минимальный $i_{\text{в. min}}$ и максимальный $i_{\text{в. max}}$ токи возбуждения определяют теперь те пределы изменений нагрузки и скорости вращения, при которых еще возможно поддержание постоянства напряжения $U_{\text{ср}}$.

Если через точку c (см. фиг. 6.3), соответствующую $U_{\text{ср}}$ на характеристике генератора при каком-то определенном режиме работы, провести вертикаль, то нетрудно видеть, что при замкнутых контактах отрезок $\overline{ab}$ изображает в некотором масштабе омическое падение напряжения в цепи возбуждения $i_{\text{в. ср}}(r_{\text{в}} + r'_{\text{д}})$, а следовательно, на основании формулы (6.5) отрезок $\overline{bc}$ дает в определенном масштабе скорость нарастания напряжения $\left(\frac{dU}{dt} \right)_{\text{з}}$, т. е. для любого переходного состояния тока возбуждения скорость нарастания напряжения выражается отрезком ординаты, проходящей через точку $U_{\text{ср}}$ соответствующей характеристики, который заключен между горизонталью, проведенной через эту точку, и лучом сопротивления.

При разомкнутом состоянии контактов скорость спадания напряжения $\left(\frac{dU}{dt} \right)_{\text{р}}$ выражается отрезком $\overline{cd}$. Это вытекает из формулы (6.6), при этом учитывается, что омическое падение напряжения в цепи возбуждения в таком случае выражается отрезком $\overline{ad}$.

Легко понять, что отрезки $\overline{bc}$ и $\overline{cd}$ соответственно равны $\Delta U_{\text{з}}$ и $-\Delta U_{\text{р}}$. На основании этого следует, что масштаб для этих отрезков, выражающих скорости изменения напряжения, получается равным $\frac{1}{T_{\text{в}}}$.

Рассмотрение диаграммы (фиг. 6.3) позволяет установить, что при переходе с режима работы при холостом ходе и максимальной скорости вращения к режиму максимальной нагрузки с минимальной скоростью вращения, скорость нарастания напряжения уменьшается, а скорость спадания напряжения, наоборот, возрастает; естественно, аналогичный характер должны иметь и изменения тока возбуждения.

Теперь на основании ранее установленного соотношения

$$\left(\frac{dU}{dt}\right)_3 : -\left(\frac{cU}{at}\right)_p = \tau_p : \tau_3 = \Delta U_3 : \Delta U_p,$$

воспользовавшись известным правилом пропорции, можно написать

$$\frac{\tau_p}{\tau_p + \tau_3} = \frac{\Delta U_3}{\Delta U_3 + \Delta U_p}.$$

Значение относительной разомкнутости контактов для рассматриваемого режима работы можно определить по диаграмме (фиг. 6.3) как отношение отрезков $\overline{bc}$ и $\overline{bd}$, потому что

$$\tau_p = \frac{\overline{bc}}{\overline{bc} + \overline{cd}} = \frac{\overline{bc}}{\overline{bd}}.$$

Точно так же получают выражение для τ_3 , для которой

$$\tau_3 = \frac{\Delta U_p}{\Delta U_3 + \Delta U_p} = \frac{\overline{cd}}{\overline{bd}}.$$

Отсюда следует, что при переходе с режима работы при холостом ходе и максимальной скорости вращения к режиму максимальной нагрузки с минимальной скоростью вращения относительная разомкнутость контактов τ_p изменяется от единицы (при холостом ходе, когда точки c и d совпадают и $\overline{bc} = \overline{cd}$) до нуля (при максимальной нагрузке, когда $\overline{bc} = 0$), после чего поддержание постоянства U_{op} при дальнейшем утяжелении режима работы оказывается невозможным.

Для относительной замкнутости контактов τ_3 имеет место обратная картина.

Аналогичные рассуждения можно было бы применить и при анализе схемы регулятора, изображенной на фиг. 4.2.

Из всего предыдущего видно, что ток возбуждения, а следовательно, и напряжение на зажимах генератора при применении вибрационных регуляторов зависят от эффективного сопротивления всей цепи возбуждения, на которое существенное влияние оказывают как схемы присоединения контактов, так и относительная замкнутость их при вибрации.

Отсюда вытекает принцип импульсного (вибрационного) метода регулирования напряжения, сущность которого и сводится к изменению соотношения времени замкнутого и разомкнутого состояний контактов регулятора при вибрации их.

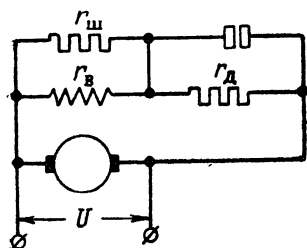
В некоторых случаях регулирования напряжения применяется схема соединений, представляющая собой некоторое усложнение схемы фиг. 4.1. Это усложнение заключается в том, что в цепи возбуждения, кроме вибрирующих контактов, присоединенных параллельно к добавочному сопротивлению r , производится шунтирование обмотки возбуждения постоянным сопротивлением $r_{ш}$. Подобная схема изображена на фиг. 6.4, и легко видеть, что в этом случае максимальное значение тока возбуждения получается при замкнутых контактах регулятора, а минимальное — при разомкнутых, т. е. в этом отношении схема аналогична схеме

фиг. 4.1. Однако если максимальное значение тока возбуждения, равное $i_{в \max} = \frac{U}{r_{в}}$, остается в обоих случаях одинаковым при прочих равных условиях, то минимальное значение оказывается при одном и том же $r_{д}$ меньше, чем в обычной схеме, благодаря чему увеличивается кратность регулирования тока возбуждения.

В случае применения схемы фиг. 6.4 кратность регулирования тока возбуждения в этом случае равна

$$k_i = \frac{i_{в \max}}{i_{в \min}} = \frac{U}{r_{в}} : \frac{U}{r_{д} + \frac{r_{ш} r_{в}}{r_{ш} + r_{в}}} \frac{r_{ш}}{r_{ш} + r_{в}} = 1 + \frac{r_{д}}{r_{в}} + \frac{r_{д}}{r_{ш}}. \quad (6.7)$$

Если бы шунтирующее обмотку возбуждения сопротивление $r_{ш}$ отсутствовало, то последний член в уравнении (6.7) также отсутствовал бы и кратность регулировки тока возбуждения была бы меньше. Из выражения (6.7) следует, что для увеличения кратности регулировки тока возбуждения нужно увеличивать сопротивление $r_{д}$ по сравнению с сопротивлением $r_{ш}$. Чем меньше сопротивление $r_{ш}$, тем больше кратность регулировки.



Фиг. 6.4. Схема включения сопротивления, шунтирующего обмотку возбуждения.

Шунтирующее сопротивление оказывает также существенное влияние на работу контактов. Выбор его производится по соображениям необходимости достижения минимума разрывной мощности контактов.

Надежность действия импульсного (вибрационного) регулятора напряжения в значительной мере зависит от качества работы контактов и состояния последних. Для того чтобы вибрирующие контакты поставить в возможно благоприятные условия работы, необходимо свести до минимума разрывную мощность контактов, установить надлежащую частоту вибраций и давление на контакты.

Электрический износ контактов зависит как от тока, так и от напряжения, и для характеристики влияния этих двух величин на работу контактов введено условное понятие о так называемой разрывной мощности контактов, которая представляет собой произведение тока, проходящего через контакты в конце периода замкнутого состояния контактов, на напряжение, появляющееся на контактах в начале размыкания их. Опыты показывают, что с увеличением разрывной мощности происходит усиление эрозии и коррозии контактов, поэтому для создания более благоприятных условий для работы контактов вибрационных регуляторов желательно стремиться к доведению разрывной мощности контактов до возможного минимума.

Для контактов современных автоматических вибрационных регуляторов самолетного типа максимально допустимое значение разрывной мощности контактов лежит в пределах 100—150 *ва*.

При применении автоматических вибрационных регуляторов напряжения осуществляются различные схемы соединений в цепи возбуждения; эти схемы включения также оказывают влияние на разрывную мощность контактов, поэтому для каждой схемы приходится определять максимально возможное для данной схемы значение разрывной мощности контактов $P_{\text{раз max}}$.

§ 6.2. АМПЛИТУДЫ ПУЛЬСАЦИЙ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПОСТОЯННОЙ ЧАСТОТЕ ВИБРАЦИИ КОНТАКТОВ

При непрерывном замыкании и размыкании контактов, присоединенных в цепи возбуждения генератора параллельно к добавочному сопротивлению, на зажимах генератора устанавливается напряжение, имеющее пульсирующий характер.

Если амплитуды пульсации относительно невелики, то они могут быть подсчитаны с достаточной точностью по формуле

$$2\delta U = \left(\frac{dU}{dt}\right)_{\text{ср. з}} t_3 = -\left(\frac{dU}{dt}\right)_{\text{ср. п}} t_p, \quad (6.8)$$

где $\left(\frac{dU}{dt}\right)_{\text{ср. з}}$ и $\left(\frac{dU}{dt}\right)_{\text{ср. п}}$ — скорости изменения напряжения в моменты времени, когда мгновенные значения напряжения на зажимах генератора проходят через средний уровень.

При вибрации контактов, происходящей с частотой f_B ,

$$t_3 = \frac{\tau_3}{f_B} \text{ и } t_p = \frac{\tau_p}{f_B}. \quad (6.9)$$

Когда вибрирующие контакты присоединены параллельно к добавочному сопротивлению, скорости изменения напряжения в предположении, что сопротивление цепи контактов r_k очень мало и практически равно нулю, могут быть вычислены по формулам

$$\left(\frac{dU}{dt}\right)_{\text{ср. з}} = \frac{U_{\text{ср}} - i_{\text{в. ср}} \cdot r_{\text{в}}}{T_B} = \frac{\Delta U_3}{T_B} \quad (6.10)$$

и

$$-\left(\frac{dU}{dt}\right)_{\text{ср. п}} = \frac{i_{\text{в. ср}} (r_{\text{в}} + r_{\text{д}}) - U_{\text{ср}}}{T_B} = \frac{\Delta U_p}{T_B}. \quad (6.11)$$

Приняв все это во внимание, находят

$$2\delta U = \frac{\Delta U_3}{T_B f_B} \cdot \frac{\Delta U_p}{\Delta U_p + \Delta U_3} \quad (6.12)$$

или

$$2\delta U = \frac{U_{\text{ср}} - i_{\text{в. ср}} r_{\text{в}}}{T_B f_B} \cdot \frac{i_{\text{в. ср}} (r_{\text{в}} + r_{\text{д}}) - U_{\text{ср}}}{i_{\text{в. ср}} r_{\text{д}}}. \quad (6.13)$$

Анализ последних формул показывает, что пульсация напряжения при постоянной частоте вибрации контактов и скорости вращения генератора происходит с различной амплитудой, зависящей от среднего напряжения $U_{\text{ср}}$, тока возбуждения $i_{\text{в. ср}}$ и сопротивлений $r_{\text{в}}$ и $r_{\text{д}}$.

В процессе поддержания постоянства среднего уровня напряжения ток в цепи возбуждения может изменяться от одного крайнего значения

$$i_{\text{в1ср}} = \frac{U_{\text{ср}}}{r_{\text{в}} + r_{\text{д}}}, \quad \tau_p = 1, \quad \tau_3 = 0 \quad (6.14)$$

до другого

$$i_{\text{в2ср}} = \frac{U_{\text{ср}}}{r_{\text{в}}}, \quad \tau_3 = 1, \quad \tau_p = 0. \quad (6.15)$$

При $i_{\text{в}} = i_{\text{в1ср}}$

$$U_{\text{ср}} = i_{\text{в1ср}} (r_{\text{в}} + r_{\text{д}}),$$

а при $i_{\text{в}} = i_{\text{в2ср}}$

$$U_{\text{ср}} = i_{\text{в2ср}} \cdot r_{\text{в}}.$$

Таким образом, амплитуды пульсаций для этих двух крайних случаев равны нулю; при переходе тока возбуждения от одного предельного значения к другому амплитуда пульсаций будет постепенно нарастать и по достижении определенного максимума убывать.

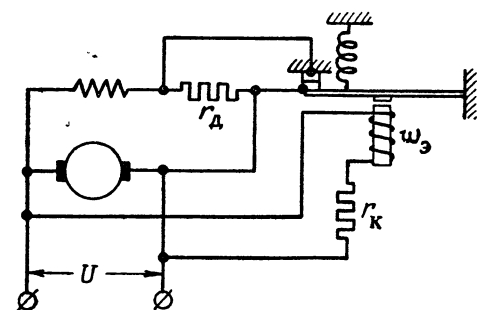
Аналитически можно показать, что при постоянной частоте вибраций контактов и скорости вращения генератора амплитуда пульсации напряжения достигает максимума при токе возбуждения, значение которого равно среднегеометрическому значению предельных токов возбуждения.

Формулы (6.12) и (6.13) наглядно показывают, что δU увеличивается с возрастанием скорости вращения n и уменьшается с увеличением частоты вибрации. Поэтому, если ставится требование, чтобы амплитуды вибрации не превосходили определенного заданного значения, необходимо частоту вибрации контактов подобрать в соответствии с конструктивными параметрами генератора, его скоростью вращения и сопротивлением его цепи возбуждения.

§ 6.3. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВА АВТОМАТИЧЕСКИХ ВИБРАЦИОННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ НАПЯЖЕНИЯ

Практически постоянство напряжения на зажимах самолетных генераторов импульсным методом поддерживается при помощи автоматических вибрационных регуляторов электромагнитного типа.

В основу устройства такого регулятора положен принцип электромагнитного прерывателя, при помощи которого создаются импульсные периодические изменения параметров цепи возбуждения посредством



Фиг. 6.5. Принципиальная схема автоматического вибрационного одноступенчатого регулятора напряжения.

прерывистого короткого замыкания добавочного сопротивления, вводимого в цепь возбуждения генератора, или обмотки возбуждения.

На фиг. 6.5 приведена принципиальная схема устройства и присоединения автоматического регулятора вибрационного типа. Основными деталями устройства его являются электромагнит и прерывательный механизм, который состоит из контактов — неподвижного и подвижного, причем подвижный контакт механически

связан с якорем электромагнита. Якорь электромагнита приходит в движение от совместного действия двух сил: силы, создаваемой пружиной, и силы электромагнитного притяжения, которая получается при прохождении тока по обмотке электромагнита.

Если вибрационный регулятор предназначен для поддержания постоянства напряжения, то обмотка электромагнита через сопротивление подключается к зажимам генератора.

Процесс автоматического регулирования напряжения посредством регулятора вибрационного типа протекает следующим образом: когда напряжение на зажимах генератора имеет значение менее того, которое необходимо поддерживать постоянным (на которое настроен регулятор), сила действия пружин превышает силу электромагнитного притяжения, и подвижный контакт прижимается к другому контакту — неподвижному; если контакты регулятора присоединены параллельно к добавочному сопротивлению r_d , включенному в цепь возбуждения генератора, то при

лена вторая пружина 12 со свободными концами, служащая для ограничения хода якоря. Неподвижный вольфрамовый контакт напаян на стальной винт 13, ввернутый в кронштейн 14, укрепленный на остова и изолированный от последнего слюдяными прокладками и изоляционными втулками. На одной из боковых сторон остова укреплена латунная накладка 15, служащая для температурной компенсации.

Катушка электромагнита регулятора напряжения состоит из рабочей обмотки ω , и уравнивающей обмотки ω_u , необходимой при параллельной работе генераторов, цепь которой при работе только одного генератора остается разомкнутой. Для того чтобы регулятор мог поддерживать напряжение на зажимах генератора постоянным, необходимо, чтобы притяжение или отпускание якоря происходило всегда при определенных и постоянных значениях напряжения, приложенного к рабочей обмотке электромагнита. Действительно, натяжение пружины не зависит от электрических факторов, поэтому усилия, создаваемые электромагнитом при притяжении или отпуске якоря, также должны оставаться постоянными. Это требует постоянства ампервитков электромагнита $AW_s = I_s \omega_s$ при заданном напряжении, на которое настроен регулятор.

Температурная компенсация. Сопротивление цепи рабочей обмотки электромагнита изменяется от нагрева (растет с увеличением температуры), и ампервитки начинают уменьшаться, так как $I_s = \frac{U}{R_s}$, что вызывает повышение напряжения на зажимах генераторов по сравнению с требуемым (если упругие свойства пружин не изменяются с увеличением температуры).

Поэтому для уменьшения влияния температуры на настройку регулятора необходимо иметь сопротивление $R_s \approx \text{const.}$ Этого достигают тем, что последовательно с рабочей обмоткой электромагнита, имеющей сопротивление r_s и выполненной из медной проволоки с температурным коэффициентом сопротивления $\alpha_{Cu} = -\frac{1}{234 + \vartheta} = 0,004^\circ \text{C}^{-1}$ при $\vartheta = 16^\circ \text{C}$,

включают дополнительное сопротивление r_k из константановой проволоки, обладающей весьма малым температурным коэффициентом сопротивления $\alpha_r = 0$. Тогда средневзвешенный температурный коэффициент сопротивления всей цепи рабочей обмотки электромагнита

$$\alpha = \frac{r_s \alpha_{Cu} + r_k \alpha_r}{r_s + r_k} \approx \frac{r_s \alpha_{Cu}}{r_s + r_k},$$

т. е. при надлежащем подборе значений r_s и r_k он может быть сделан достаточно малым, и R_s с увеличением температуры будет изменяться весьма незначительно.

Но таким путем полной температурной компенсации добиться не удастся, так как α_{Cu} , а следовательно, и α не равны нулю. Уменьшение жесткости пружины с повышением температуры хотя и создает дополнительную компенсацию, однако приходится считаться еще с некоторым увеличением воздушного зазора между якорем и сердечником за счет различных линейных расширений корпуса и сердечника электромагнита.

Поэтому приходится добавлять упомянутую выше латунную накладку, линейный коэффициент расширения которой больше такового же для стального остова электромагнита. Благодаря наличию накладки, образующей вместе с остовом электромагнита биметаллический элемент, боковая стенка остова изгибается (выпуклостью наружу), что вызывает некоторое уменьшение воздушного зазора и натяжения пружины, а следовательно, и ампервитков, необходимых для создания соответствующей силы при-

тяжения якоря. В конечном результате можно добиться того, чтобы притяжение якоря наступало почти при одном и том же напряжении.

Настройка регулятора. В рассматриваемом типе регулятора применен магнитный способ настройки его на заданное напряжение. Изменение магнитного сопротивления цепи в данном случае достигается путем соответствующего регулирования первоначального воздушного зазора между якорем и сердечником регулятора, когда в обмотке электромагнита регулятора нет тока.

Для изменения воздушного зазора в данном регуляторе сердечник имеет специальную конструкцию. Он состоит из двух сердечников: полого неподвижного сердечника 1, ввернутого в остов на резьбе и законтренного гайкой 3, и подвижного сердечника 5, расположенного внутри первого.

Подвижный сердечник имеет шпоночную канавку, дающую ему возможность осевого перемещения. Перемещают подвижный сердечник при помощи регулировочного винта 6 с двумя правыми резьбами разного шага. В неподвижный сердечник регулировочный винт ввертывается на резьбе с шагом 0,5 мм, а в подвижный — на резьбе с шагом 0,6 мм. Таким образом, при повороте регулировочного винта на один оборот подвижный сердечник перемещается на 0,1 мм и на ту же величину изменяется воздушный зазор, увеличиваясь при ввертывании регулировочного винта и уменьшаясь при вывертывании его. Таким образом, для увеличения напряжения надо ввертывать регулировочный винт.

Для удобства регулирования на наружном конце регулировочного винта насажен диск 7 с крупной накаткой, положение которого фиксируется пружиной 8. Такой способ изменения воздушного зазора обеспечивает более точную настройку.

§ 6. 5. АМПЛИТУДА ПУЛЬСАЦИЙ НАПРЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТА ВИБРАЦИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВИБРАЦИОННОГО РЕГУЛЯТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

При применении автоматических вибрационных регуляторов процесс стабилизации напряжения сопровождается установившимися автоколебаниями. Частота этих колебаний является очень важным параметром, характеризующим работу вибрационного регулятора напряжения. Чем больше частота автоколебаний, тем меньше амплитуда пульсации напряжения генератора. Амплитуду пульсации напряжения генератора стремятся сделать как можно меньше, чтобы тем самым уменьшать мешающее действие работы регулятора на радиоприем. Весьма важно иметь небольшую амплитуду пульсации напряжения генератора также в том случае, когда он работает параллельно с аккумулятором.

Так как э. д. с. аккумулятора является величиной постоянной, а э. д. с. генератора пульсирует около среднего значения, то между генератором и аккумулятором появляются уравнивающие токи, которые могут достигать больших величин.

Уравнивающий ток между генератором и аккумулятором можно представить в следующем виде:

$$i = \frac{E_r - E_a}{\sum R_i}, \quad (6. 16)$$

где $\sum R_i$ — сумма внутренних сопротивлений в системе генератор—аккумулятор.

Так как внутреннее сопротивление в системе генератор—аккумулятор невелико, то при значительном отклонении E_r от E_a могут иметь место

большие уравнивающие токи, что недопустимо как для аккумулятора, так и для генератора. Поэтому в отношении пульсации напряжения генератора ставятся определенные требования.

Так как допустимые амплитуды пульсаций напряжения δU весьма невелики, то кривые нарастания и спадания напряжения при вибрациях контактов регулятора вполне могут быть заменены прямолинейными участками.

При этом допущении амплитуда пульсаций δU может быть выражена так:

$$2\delta U = \frac{\Delta U_3}{T_B} \tau_3 t_B,$$

а частота вибраций

$$f_B = \frac{U_{\text{ср}} - i_B \cdot \text{ср} r_B}{2\delta U} \frac{\tau_3}{T_B}. \quad (6.17)$$

При автоматическом регулировании напряжения τ_3 может приобретать два крайних значения — 0 и 1, при которых автоколебания в системе регулирования прекращаются, и частота вибрации контактов, следовательно, становится равной нулю.

Отсюда следует, что при некотором промежуточном значении τ_3 частота вибрации должна достигать максимума.

Из уравнения (6.17) видно, что при прочих равных условиях увеличение постоянной времени возбуждения генератора должно снижать частоту вибраций. Но $T_B = \frac{\text{const}}{n} = \frac{k}{n}$, и если подставить это ее выражение в формулу (6.17), то получаем

$$f_B = \frac{(U_{\text{ср}} - i_B \cdot \text{ср} r_B)}{2\delta U} \frac{\tau_3 n}{k}, \quad (6.18)$$

т. е. при $\delta U = \text{const}$ частота вибраций возрастает с увеличением скорости вращения генератора.

На фиг. 6.7 изображена зависимость частоты вибрации контактов

$f_B = \frac{1}{t_B}$ от τ_3 , а следовательно, и от тока возбуждения.

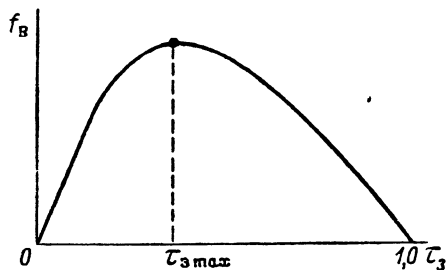
Из фиг. 6.7 видно, что с увеличением нагрузки частота вибраций при прочих равных условиях возрастает до определенного максимального значения, а затем начинает постепенно убывать.

Собственная частота вибрации якоря может быть определена из выражения

$$f_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (6.19)$$

где k — коэффициент жесткости пружины в кг/см, а m — масса якорька в кг сек²/см.

Для надежной работы регулятора необходимо, чтобы собственная частота якоря была значительно выше частоты вынужденных колебаний, т. е. $f_0 \gg (1,5 \div 2) f_{B \text{ max}}$.



Фиг. 6.7. Зависимость частоты вибраций контактов от относительной замкнутости контактов.

§ 6.6. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВИБРАЦИИ КОНТАКТОВ

Если применять обычные схемы включения вибрационного регулятора, то частота вибраций будет небольшой.

Уменьшения амплитуды пульсаций, или, что то же самое, увеличения частоты автоколебаний в электромагнитных вибрационных регуляторах самолетного типа, достигают включением обмотки электромагнита регулятора не непосредственно на зажимы генератора, а через часть $r_{\text{уск}}$ добавочного сопротивления r_d ($r_{\text{уск}}$ — ускоряющее сопротивление).

Схема соединений при использовании ускоряющего сопротивления для повышения частоты вибраций изображена на фиг. 6.8, из которой видно, что обмотка электромагнита присоединена к зажимам генератора не непосредственно, а через так называемое ускоряющее сопротивление $r_{\text{уск}}$ (равное обычно 1,5—2 ом), являющееся частью добавочного сопротивления r_d . При таком способе соединения цепь обмотки электромагнита регулятора находится под полным напряжением генератора, когда контакты регулятора замкнуты. В период разомкнутого состояния контактов напряжение на обмотке электромагнита оказывается ниже напряжения генератора на величину падения напряжения в ускоряющем сопротивлении. Вследствие этого при размыкании контактов скорость уменьшения тока в обмотке электромагнита возрастает, сила притяжения якоря электромагнита резко снижается, что вызывает уменьшение времени разомкнутого и замкнутого состояний контактов и вследствие этого повышение частоты вибраций.

Если пренебречь влиянием добавочного падения напряжения в сопротивлении r_d от тока электромагнита регулятора, то напряжение U_p , под которым находится цепь обмотки электромагнита при разомкнутых контактах, равно

$$U_{\text{э.р}} = U - \beta r_d (i_{\text{ш}} + i_{\text{в}}), \quad (6.20)$$

где

$$\beta = \frac{r_{\text{уск}}}{r_d}.$$

Для схемы фиг. 6.8 можно получить

$$i_{\text{д.р}} = \frac{U}{r_{\text{ш}} + r_d} + i_{\text{в}} \frac{r_{\text{ш}}}{r_{\text{ш}} + r_d}, \quad (6.21)$$

где $i_{\text{д.р}} = i_{\text{ш}} + i_{\text{в}}$.

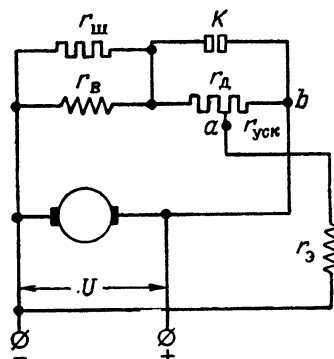
Подставляя выражение (6.21) в (6.20), приходят к следующему выражению для $U_{\text{э.р}}$:

$$U_{\text{э.р}} = U - U \frac{r_{\text{уск}}}{r_{\text{ш}} + r_d} - \frac{i_{\text{в}} r_{\text{ш}} r_{\text{уск}}}{r_{\text{ш}} + r_d} = U \left[\frac{r_{\text{ш}} + (1 - \beta) r_d}{r_{\text{ш}} + r_d} \right] - \beta i_{\text{в}} r'_d,$$

где

$$r'_d = \frac{r_{\text{ш}} r_d}{r_{\text{ш}} + r_d}. \quad (6.22)$$

Анализ выражения (6.22) показывает, что напряжение $U_{\text{э.р}}$ с увеличением тока возбуждения уменьшается и может приобрести не только



Фиг. 6.8. Принципиальная схема вибрационного регулятора напряжения с ускоряющим сопротивлением.

нулевое значение, но даже и отрицательное, если увеличить коэффициент β . Выбирая различные значения для β , можно получить необходимую частоту вибрации. Увеличение $r_{\text{уок}}$ позволяет достигнуть очень высоких частот вибрации, однако чрезмерное повышение последней нежелательно с точки зрения механической прочности вибрирующей части регулятора.

Так как направление силы притяжения в электромагните не зависит от знака напряжения, приложенного к обмотке электромагнита, то коэффициент β рекомендуется подбирать так, чтобы при возрастании тока возбуждения i_b напряжение $U_{\text{э.р}}$ несколько не доходило до нулевого значения.

Подобного рода схема применяется в регуляторах, находящихся в регуляторных коробках типа РК. При этом максимальные значения частоты вибрации составляют:

$$\begin{aligned} \text{при холостом ходе} & \dots \dots \dots f_{\text{в 0 max}} = 85-90 \text{ гц} \\ \text{при полной нагрузке} & \dots \dots \dots f_{\text{в max}} = 120-140 \text{ „} \end{aligned}$$

К недостаткам этого способа увеличения частоты пульсации следует отнести то, что среднее напряжение электромагнита зависит от тока возбуждения, а следовательно, и среднее напряжение генератора зависит от i_b . Среднее напряжение электромагнита за период вибрации равно

$$U_{\text{э. ср}} = \tau_z U_{\text{э. з}} + \tau_p U_{\text{э. р}}. \quad (6.23)$$

Так как $U_{\text{э.р}}$ уменьшается, то снижается и $U_{\text{э. ср}}$ электромагнита, причем это уменьшение напряжения, как это следует из уравнения (6.22), зависит от i_b . Для того чтобы избежать этого нежелательного явления, применяют дополнительную обмотку на регуляторе напряжения, через которую пропускается ток, пропорциональный току возбуждения генератора.

Так как введение ускоряющего сопротивления снижает среднюю величину напряжения, то ампервитки дополнительной обмотки должны действовать противоположно основным ампервиткам электромагнита, т. е. дополнительная обмотка должна быть включена дифференциально. Ампервитки дополнительной обмотки можно подобрать так, чтобы среднее напряжение генератора стало даже больше того напряжения, которое имел бы генератор без дополнительной обмотки и без ускоряющего сопротивления. Изменяя ампервитки дополнительной обмотки, можно «подстраивать» величину среднего напряжения генератора во время работы.

Глава VII

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА САМОЛЕТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ: ДРУГ С ДРУГОМ И С АККУМУЛЯТОРНЫМИ БАТАРЕЯМИ

§ 7.1. НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ

Рост числа потребителей электрической энергии на самолетах требует увеличения мощности генераторов и аккумуляторов. Применение аккумуляторной батареи очень большой емкости нерационально вследствие ее больших габаритных размеров и веса. Получение большой мощности возможно от одного генератора, приводимого в действие от авиационного двигателя, или путем установки нескольких генераторов, но меньшей мощности и работающих параллельно. Последний путь является более рациональным, и поэтому на самолетах с двумя или более авиационными двигателями обычно устанавливаются два или несколько генераторов, работающих на отдельные группы потребителей или параллельно на общую сеть. Параллельная работа самолетных генераторов увеличивает надежность снабжения потребителей электрической энергией, создавая резерв на случай выхода из строя одного из генераторов за счет порчи его или остановки авиационного двигателя, который приводит его в движение. Кроме того, при параллельной работе улучшается использование генераторов и создается возможность установки аккумуляторной батареи меньшей емкости.

Для параллельной работы двух или нескольких генераторов необходимо соблюдение определенных условий:

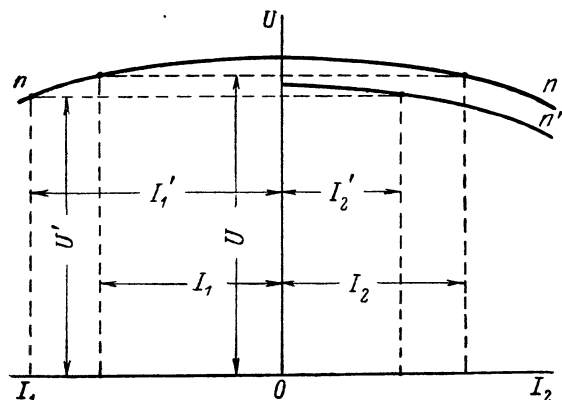
- 1) генераторы должны иметь одинаковые напряжения;
- 2) полярность присоединяемых к общим шинам проводов, идущих от генераторов, должна быть правильной (плюс с плюсом, минус с минусом).

При совместной работе генераторов с параллельным возбуждением общая нагрузка распределяется между ними в зависимости от электрических и механических характеристик агрегатов (генератора и двигателя).

Если параллельно работающие генераторы вращаются со строго одинаковой скоростью и имеют совершенные идентичные внешние характеристики, то распределение общей нагрузки между машинами происходит автоматически пропорционально их номинальным мощностям. При одинаковых номинальных мощностях оба генератора в этом случае отдают в сеть равные токи. При различных внешних характеристиках распределение нагрузки становится неравномерным.

Обычно на самолете для параллельной работы устанавливаются только однотипные генераторы одинаковой мощности, но обеспечение их нормальной совместной работы связано со специфическими трудностями.

Равномерное распределение нагрузки, желательное во многих отношениях, не достигается само собою, если генераторы вращаются с различными скоростями, что в действительных условиях всегда может быть ввиду трудности достижения полного синхронизма во вращении двух или нескольких авиадвигателей.



Фиг. 7.1. Распределение нагрузок между параллельно работающими генераторами при различных скоростях вращения.

Генераторов напряжения, недопустима. На фиг. 7.1 представлены внешние характеристики двух однотипных генераторов для различных скоростей вращения при постоянном сопротивлении цепи возбуждения. Эти кривые показывают, что даже при незначительном изменении скорости вращения одной из машин с n на $n' < n$ распределение тока нагрузки $I_n = I_1 + I_2 = I_1' + I_2'$ между машинами делается неравномерным и, кроме того, общее напряжение изменяется с U на $U' < U$.

§ 7.2. ВКЛЮЧЕНИЕ РЕГУЛЯТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ГЕНЕРАТОРОВ

К самолетным генераторным установкам предъявляется требование, чтобы они давали электрическую энергию при постоянном напряжении независимо от скорости вращения и нагрузки каждого из них. При включении генераторов на общие шины возникает вопрос: куда следует приключать автоматические регуляторы напряжения?

Можно представить два способа включения автоматических регуляторов напряжения.

1) Регуляторы включены на общие шины генераторов, как указано на фиг. 7.2, на которой приведена принципиальная схема соединения двух параллельно работающих генераторов.

При такой схеме распределение общего тока нагрузки I между генераторами может быть найдено на основании следующих соотношений:

$$I = I_1 + I_2; \quad I_1 = \frac{U_1 - U}{r_1}; \quad I_2 = \frac{U_2 - U}{r_2}; \quad I = \frac{U}{R}, \quad (7.1)$$

где U_1 и U_2 — напряжения на зажимах генераторов;

U — напряжение на общих шинах;

r_1 и r_2 — сопротивления проводов, соединяющих плюсовые зажимы генераторов с шиной;

R — сопротивление внешней цепи (нагрузки).

Отсюда следует, что

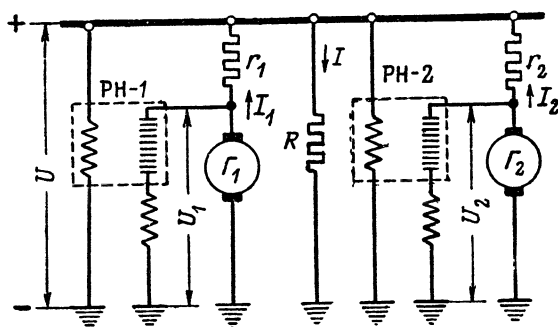
$$\frac{U}{R} = \frac{U_1 - U}{r_1} + \frac{U_2 - U}{r_2}, \quad (7.2)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_1 - U}{U_2 - U} \frac{r_2}{r_1} \quad (7.3)$$

и

$$\frac{U_1}{r_1} + \frac{U_2}{r_2} = U \left[\frac{1}{R} + \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right]. \quad (7.4)$$

Из последних формул видно, что распределение заданной общей нагрузки между генераторами при постоянных параметрах электрических цепей зависит от U_1 и U_2 .



Фиг. 7.2. Присоединение регуляторов напряжения на общие шины генераторов.

Для того чтобы между двумя одинаковыми генераторами нагрузка распределялась поровну, необходимо при $r_1 = r_2$ иметь равенство $U_1 = U_2$. Но напряжения U_1 и U_2 даже при $I_1 = I_2$ в общем случае не равны между собой, так как они зависят от э. д. с. E_1 и E_2 , которые в свою очередь зависят от токов возбуждения, и скоростей вращения, с которыми приводятся в движение генераторы. Так как токи возбуждения устанавливаются в каждом генераторе при помощи отдельного регулятора, то необходимо последние включать так, чтобы распределение токов было однозначным согласно заданному требованию.

Между тем если регуляторы напряжения генераторов присоединены к сборным шинам, то они, естественно, реагируют на всякое отклонение напряжения на шинах и каждый из них стремится поддерживать постоянство напряжения U . Но при $U = \text{const}$ и $R = \text{const}$

$$\frac{U_1}{r_1} + \frac{U_2}{r_2} = \text{const}.$$

Это равенство может быть удовлетворено не при одних определенных значениях U_1 и U_2 , а при бесконечном числе их.

Таким образом, при присоединении автоматических регуляторов непосредственно к сборным шинам нагрузка между генераторами распределяется произвольно, а не равномерно.

2) Регуляторы включены непосредственно на зажимы генераторов, как указано на фиг. 7.3.

Теперь регуляторы напряжения поддерживают напряжения U_1 и U_2 , при этом на общих шинах устанавливается напряжение U . В этом случае выражение (7.3) для распределения токов удобнее представить в несколько ином виде.

Так как

$$I_2 = I - I_1 = I - \frac{U_1 - U}{r_1} = \frac{Ir_1 - U_1 + U}{r_1}, \quad (7.5)$$

а, с другой стороны,

$$I_2 = \frac{U_2 - U}{r_2}, \quad (7.6)$$

то, приравнявая правые части полученных выражений (7.5) и (7.6), после преобразований находят

$$U = \frac{r_1 U_2 + r_2 U_1 - r_1 r_2 I}{r_1 + r_2}. \quad (7.7)$$

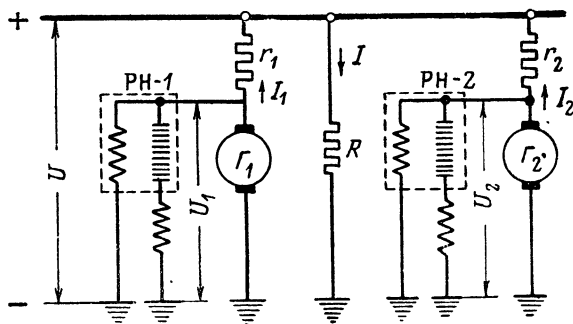
Подставляя полученное для U выражение (7.7) в формулу для отношения токов I_1 и I_2 (7.3), окончательно имеют

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{(U_1 - U_2) + r_2 I}{(U_2 - U_1) + r_1 I}. \quad (7.8)$$

Так как теперь регуляторы напряжения поддерживают на определенном уровне U_1 и U_2 , то при заданных значениях общего нагрузочного

тока I и сопротивлений r_1 и r_2 отношение токов $I_1 : I_2$ приобретает вполне определенное значение. Для получения $I_1 = I_2$ при всех значениях I необходимо иметь $U_1 = U_2$ и $r_1 = r_2$.

Из сказанного выше вытекает, что для достижения желаемого распределения тока общей нагрузки между параллельно работающими генераторами необходимо каждый генератор присоединить не непосредственно к



Фиг. 7.3. Присоединение регуляторов напряжения к зажимам параллельно работающих генераторов.

сборным шинам, а через добавочные сопротивления; при этом в качестве таких добавочных сопротивлений могут служить отдельные участки проводов, соединяющих генераторы со сборными шинами. (Это положение справедливо лишь для регуляторов, не имеющих уравнительных обмоток.)

Что касается регуляторов напряжения, то они должны быть присоединены непосредственно к зажимам каждого генератора.

Если $r_1 = r_2$ и $U_1 = U_2$, то

$$U = \frac{U_1}{1 + \frac{r_1}{2R}}.$$

§ 7.3. РОЛЬ УРАВНИТЕЛЬНОЙ ОБМОТКИ

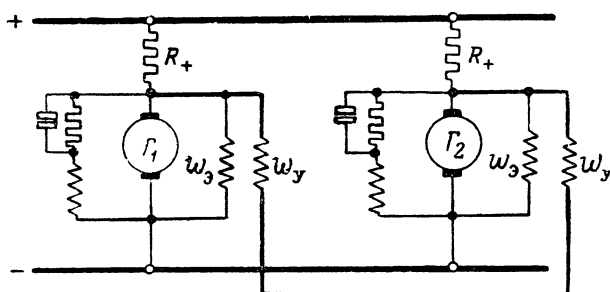
При параллельной работе генераторов необходимо обращать особое внимание на подбор сопротивлений проводов, соединяющих генераторы с общими шинами, и на настройку регуляторов напряжения, с тем чтобы они поддерживали одинаковые напряжения на зажимах каждого генератора. Однако в процессе работы настройка регуляторов на одинаковые напряжения, если бы она и была вначале в точности осуществлена,

неизбежно нарушается вследствие влияния температуры в результате изменения параметров регуляторов и неполного соответствия характеристик совместно работающих регуляторов напряжения.

Для того чтобы исключить действие перечисленных причин, необходимо устройство, которое автоматически выравнивало бы напряжения обоих генераторов. Для этой цели применяется специальная обмотка (выравнивающая или уравнивательная) с небольшим числом витков, располагаемая на том же сердечнике электромагнита регулятора напряжения, как и его рабочая параллельная обмотка.

При параллельной работе генераторов, снабженных регуляторами напряжения, возможны два случая включения уравнивательной цепи:

1) между плюсовыми зажимами генераторов (фиг. 7.4); такая схема обычно используется при работе генераторов с вибрационными регуляторами;



Фиг. 7.4. Включение уравнивательной цепи при параллельной работе генераторов, снабженных вибрационными регуляторами напряжения.

2) между отрицательными зажимами генераторов так, как это указано на фиг. 7.5; такое включение применяется при работе генераторов повышенной мощности, снабженных угольными регуляторами напряжения.

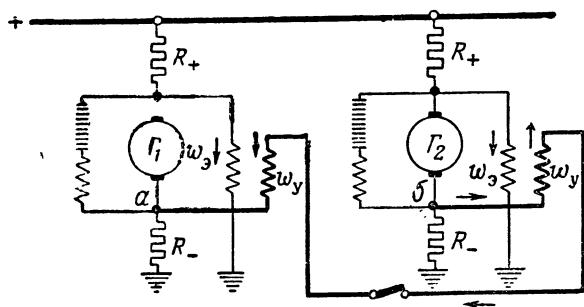
И в том и в другом случаях токи в уравнивательных обмотках создаются за счет разности потенциалов, возникающей вследствие неодинакового падения напряжения на отдельных участках цепи. Так, например, в схеме с угольными регуляторами напряжения ток в уравнивательной цепи создается за счет разности потенциалов, возникающей вследствие неодинакового падения напряжения на специальных балластных сопротивлениях R_- , включенных в минусовые цепи генераторов.

В схеме с вибрационными регуляторами необходимое падение напряжения создается при прохождении токов I_1 и I_2 по последовательным обмоткам реле обратного тока (минимального реле) и регулятора тока (максимального реле). Эти обмотки и участки соединительных проводов служат как бы балластными сопротивлениями R_+ .

Назначение этой обмотки и самый процесс выравнивания напряжения удобнее рассмотреть на примере соединения двух параллельно работающих генераторов, снабженных угольными регуляторами напряжения, изображенным на фиг. 7.5.

Если предположить теперь, что генератор G_1 имеет более высокое напряжение, чем другой G_2 , то при равенстве сопротивлений в плюсовых и минусовых цепях генераторов ток, отдаваемый первым генератором, больше тока второго. Следовательно, падение напряжения на балластном сопротивлении в цепи первого генератора больше, чем в цепи второго, а потенциал точки b больше потенциала точки a (фиг. 7.5). По уравнивательной цепи протекает ток от точки b к точке a .

Уравнительная и рабочая обмотки электромагнита регулятора напряжения соединены так, что м. д. с. их в этом случае складываются для регулятора генератора Γ_1 и вычитаются для регулятора генератора Γ_2 . Вследствие этого сила притяжения электромагнита регулятора Γ_1 генератора несколько возрастает,



Фиг. 7.5. Включение уравнительной цепи при параллельной работе генераторов, снабженных угольными регуляторами напряжения.

угольный столбик удлиняется, сопротивление его, а следовательно, и сопротивление цепи возбуждения увеличивается, что приводит к понижению напряжения генератора Γ_1 . Для второго генератора имеет место обратная картина; в итоге напряжение генератора Γ_1 понижается, а напряжение генератора Γ_2 повышается.

Таким образом, токи, проходящие по уравнительным обмоткам, стремятся свести $\Delta U = U_1 - U_2$ к минимуму, т. е. уменьшить небаланс напряжения. Для того чтобы действие уравнительных обмоток было более эффективным, сопротивление их и провода, соединяющего их зажимы, должно быть доведено до минимума, чтобы иметь возможно большие ампервитки при малых значениях ΔU .

Более подробное рассмотрение условий, необходимых для правильного распределения нагрузки между параллельно работающими генераторами, дано при дальнейшем анализе схемы фиг. 7.5.

§ 7.4. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ДВУХ ГЕНЕРАТОРОВ, СНАБЖЕННЫХ РЕГУЛЯТОРАМИ НАПЯЖЕНИЯ

При параллельной работе самолетных генераторов, рассчитанных на нагрузки в несколько сот ампер, предъявляются повышенные требования в отношении точности настройки регуляторов напряжения и распределения нагрузки.

Невыполнение при эксплуатации основных условий параллельной работы, о которых будет сказано ниже, особенно в системах, рассчитанных на большие токи, может приводить к неустойчивой работе системы при малых нагрузках сети и к значительной неравномерности распределения тока между генераторами при больших нагрузках.

Как видно из фиг. 7.5, на которой представлена наиболее распространенная схема параллельной работы двух генераторов равной мощности, рабочие обмотки электромагнитов ω_z регуляторов напряжения включаются между минусовой шиной или массой самолета и плюсовыми зажимами генераторов.

Цепь уравнительных обмоток присоединяется к минусовым выводам генераторов, причем роль балластных сопротивлений R_- выполняют специальные калиброванные сопротивления типа, изображенного на фиг. 7.6.

Условия, выполнение которых необходимо для равномерного распределения нагрузки, и характер распределения нагрузки между двумя параллельно работающими генераторами могут быть выяснены путем анализа принципиальной схемы, изображенной на фиг. 7.7, когда уравнительная цепь включена между минусовыми зажимами генераторов.

Следует отметить, что проводимый анализ параллельной работы справедлив для любого типа регуляторов при включении уравнивающей цепи между минусовыми зажимами генераторов.

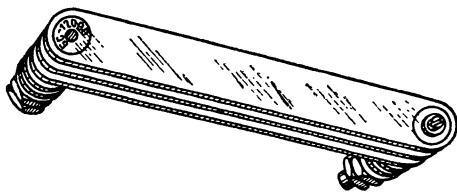
Отдельные участки этой схемы имеют следующие сопротивления:

r_{y1} и r_{y2} — сопротивления уравнивающих обмоток первого и второго регуляторов напряжения;

r_0 — сопротивление уравнивающего провода;

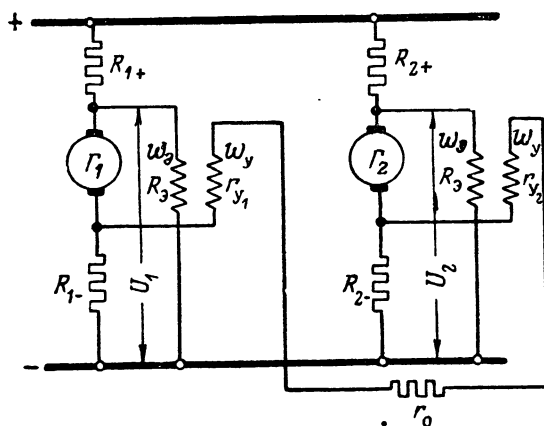
R_{1+} и R_{2+} — сопротивления положительных участков генераторных цепей, которые состоят из сопротивлений положительных проводов (от соответствующего генератора до распределительного щита), переходных сопротивлений контактов и сопротивлений последовательных обмоток реле обратного тока;

R_{1-} и R_{2-} — балластные сопротивления.



Фиг. 7.6. Калиброванное сопротивление.

Если при холостом ходе генераторов и отключенной уравнивающей цепи напряжения настройки регуляторов соответственно равны U_{10} и U_{20} , причем $U_{10} > U_{20}$, то при включении нагрузки и уравнивающей цепи ре-



Фиг. 7.7. Упрощенная принципиальная схема параллельной работы двух генераторов, снабженных угольными регуляторами напряжения.

зультатирующие ампервитки обмоток электромагнитов регуляторов напряжения получают соответственно равными:

для регулятора напряжения первого генератора.

$$AW_1 = \frac{U_{10}}{R_9} \omega_9 = \frac{U_1}{R_9} \omega_9 + i_y \omega_y; \quad (7.9)$$

для регулятора напряжения второго генератора

$$AW_2 = \frac{U_{20}}{R_9} \omega_9 = \frac{U_2}{R_9} \omega_9 - i_y \omega_y, \quad (7.10)$$

где U_1 и U_2 — напряжения на зажимах генераторов при включенной уравнивающей цепи и токе нагрузки $I = I_1 + I_2$;

R_s — сопротивление обмотки электромагнита регулятора напряжения;
 w_s — число витков обмотки электромагнита регулятора напряжения;
 w_y — число витков уравнительной обмотки;
 i_y — ток в уравнительной цепи.

Уравнения (7.9) и (7.10) соответствуют астатической настройке регуляторов напряжения, при которой для любого установившегося режима работы состояние равновесия имеет место при постоянной величине ампервитков (AW_1 или AW_2) электромагнита регулятора напряжения. Обозначив

$$\frac{R_s w_y}{w_s} = \alpha, \quad (7.11)$$

из выражений (7.9) и (7.10) получают

$$\begin{cases} U_1 = U_{10} - \alpha i_y, \\ U_2 = U_{20} + \alpha i_y, \end{cases} \quad (7.12)$$

при этом предполагается, что параметры обоих регуляторов напряжения одинаковы.

Уравнения (7.12) показывают, что наличие уравнительного тока вызывает уменьшение напряжения первого генератора и увеличение напряжения второго генератора.

Величина уравнительного тока i_y , протекающего по уравнительной цепи, может быть определена из уравнения

$$(I_1 - i_y)R_{1-} - i_y(2r_y + r_0) - (I_2 + i_y)R_{2-} = 0, \quad (7.13)$$

$$i_y = \frac{I_1 R_{1-} - I_2 R_{2-}}{R_{1-} + R_{2-} + 2R_y}, \quad (7.14)$$

где $2R_y = 2r_y + r_0$.

По уравнительным обмоткам ток будет протекать тогда, когда падения напряжения на балластных сопротивлениях не равны между собой. При равных значениях этих сопротивлений это может иметь место лишь при неравномерной нагрузке, появляющейся при неодинаковых напряжениях на зажимах генераторов.

Если, например, напряжение первого генератора из-за расстройки регулятора больше, чем второго, то в этом случае первый генератор нагружается большим током, чем второй.

Между точками присоединения уравнительных обмоток появляется разность потенциалов, и по ним потечет ток, который вызовет появление ампервитков уравнительной обмотки регулятора первого генератора одинакового направления с ампервитками рабочей обмотки, а в регуляторе второго генератора, наоборот, — противоположного.

Поэтому поскольку результирующие ампервитки регулятора должны оставаться неизменными, напряжение на первом генераторе понизится, а на втором повысится. В результате разница в напряжениях и небаланс в токах нагрузки генераторов уменьшается.

Токи I_1 и I_2 генераторов можно выразить через общий ток нагрузки $I_n = I_1 + I_2$ и так называемый поперечный ток

$$I_q = \frac{I_1 - I_2}{2}, \quad (7.15)$$

а именно

$$I_1 = \frac{I_H}{2} + I_q, \quad (7.16)$$

$$I_2 = \frac{I_H}{2} - I_q. \quad (7.17)$$

Величиной поперечного тока I_q характеризуется неравномерность распределения нагрузки между генераторами (небаланс токов). Очевидно, что при равномерном распределении нагрузки, т. е. при $I_1 = I_2$, $I_q = 0$.

Из схемы фиг. 7.7 следует, что

$$U_1 - I_1 R_{1+} = U_2 - I_2 R_{2+}. \quad (7.18)$$

После преобразований из выражений (7.9), (7.10), (7.12) и (7.18) получают выражение для величины поперечного тока:

$$\begin{aligned} I_q = & \frac{(U_{10} - U_{20})(R_{1-} + R_{2-} + 2R_y)}{(R_{1+} + R_{2+})(R_{1-} + R_{2-} + 2R_y) + 2\alpha(R_{1-} + R_{2-})} - \\ & - \frac{I_H}{2} \frac{(R_{1+} - R_{2+})(R_{1-} + R_{2-} + 2R_y)}{(R_{1+} + R_{2+})(R_{1-} + R_{2-} + 2R_y) + 2\alpha(R_{1-} + R_{2-})} - \\ & - \frac{I_H}{2} \frac{2\alpha(R_{1-} - R_{2-})}{(R_{1+} + R_{2+})(R_{1-} + R_{2-} + 2R_y) + 2\alpha(R_{1-} + R_{2-})}. \end{aligned} \quad (7.19)$$

Выражение (7.19) показывает, что при любой нагрузке системы $I_H = I_1 + I_2$ равномерное распределение ее между параллельно работающими генераторами возможно лишь в случае выполнения трех условий:

- а) $U_{10} = U_{20}$;
- б) $R_{1+} = R_{2+}$;
- с) $R_{1-} = R_{2-}$;

при этом $I_q = 0$ и, следовательно, $I_1 = I_2$.

Невыполнение любого из этих условий вызывает неравномерное распределение нагрузки и ведет к нарушению нормальной работы генераторов.

Для выяснения влияния отдельных факторов на характер распределения нагрузки между генераторами целесообразно рассмотреть аналогично тому, как это было сделано раньше, три частных случая:

1) Влияние неравенства напряжений настройки регуляторов на распределение нагрузки между генераторами ($U_{10} > U_{20}$; $R_{1-} = R_{2-} = R_-$; $R_{1+} = R_{2+} = R_+$).

Одной из наиболее вероятных в условиях эксплуатации причин, вызывающих ненормальное распределение нагрузки между генераторами, работающими на общую сеть, является неравенство напряжений, поддерживаемых регуляторами.

Поддержание строго одинаковых напряжений на зажимах параллельно включенных генераторов при изменении их скорости вращения и при меняющейся нагрузке исключается уже тем, что сами регуляторы в процессе работы допускают известные колебания напряжения.

Кроме того, неравенство напряжений, поддерживаемых регуляторами, может быть обусловлено еще целым рядом причин:

- а) неточностью настройки регуляторов на равные напряжения;
- б) влиянием изменяющихся температурных условий вследствие несовершенства температурной компенсации;
- в) расстройкой регуляторов в процессе работы;

г) неполным соответствием характеристик совместно работающих регуляторов напряжения.

Для схемы (фиг. 7.7) при разомкнутой цепи уравнильных обмоток справедливы следующие равенства:

$$U_{10} - I_1 R_{1+} = U_{20} - I_2 R_{2+}; \quad (7.20)$$

$$I_1 + I_2 = I_n; \quad (7.21)$$

$$I_{q0} = \frac{U_{10} - U_{20}}{R_{1+} + R_{2+}}, \quad (7.22)$$

где I_{q0} — поперечный ток, характеризующий равномерность распределения нагрузки между генераторами при разомкнутой уравнильной цепи и определяемый выражениями

$$I_1 = \frac{I_n}{2} + I_{q0}; \quad (7.23)$$

$$I_2 = \frac{I_n}{2} - I_{q0}. \quad (7.24)$$

Так как сопротивления проводов R_{1+} и R_{2+} обычно выбираются такими, чтобы падения напряжения в них при номинальных токах генераторов не превышали $0,02 U_{ном}$, то из равенства (7.22) ясно, что при разомкнутых уравнильных обмотках параллельная работа генераторов по схеме (см. фиг. 7.5) невозможна, так как разность напряжений настройки регуляторов $U_{10} - U_{20} = 0,02 U_{ном}$ вызвала бы поперечный ток, равный

$$I_{q0} = \frac{1}{2} \frac{0,02 U_{ном}}{0,02 U_{ном}} = \frac{I_{ном}}{2} \quad (7.25)$$

и разность токов

$$I_1 - I_2 = 2I_{q0} = I_{ном}.$$

При замыкании цепи уравнильных обмоток величина поперечного тока уменьшается вследствие их выравнивающего действия. Из выражения (7.19) следует, что

$$I_q = \frac{U_{10} - U_{20}}{2R_+ \left[1 + \frac{\alpha R_-}{R_+ (R_y + R_-)} \right]}. \quad (7.26)$$

Отношение поперечных токов (I_q — при включенной уравнильной цепи к I_{q0} — при отключенной уравнильной цепи) равно

$$\frac{I_q}{I_{q0}} = \frac{1}{1 + \frac{\sigma R_-}{R_+ (R_y + R_-)}}, \quad (7.27)$$

т. е.

$$I_q < I_{q0}. \quad (7.28)$$

Таким образом, при наличии уравнильной цепи нагрузка распределяется между генераторами более равномерно. Через уравнильные обмотки протекает ток такого направления, при котором напряжение более нагруженного генератора уменьшается, а менее нагруженного генератора — увеличивается, поэтому установившаяся разность напряжений и токов получается относительно небольшой.

При неравенстве напряжений настройки регуляторов величина поперечного тока, как это видно из формулы (7.26), не зависит от тока нагрузки и для данной расстройки регуляторов $U_{10}-U_{20}$ является величиной постоянной. Из фиг. 7.8, на которой изображено распределение нагрузки между генераторами, следует, что даже при отсутствии нагрузки во внешней цепи генераторов существует некоторый поперечный ток I_q .

При $U_{10} > U_{20}$ и при $I_n = 0$ первый генератор работает в генераторном режиме с током нагрузки I_q . Второй генератор при этом работает в двигательном режиме, и ток I_q является для него током потребления, а не нагрузки (обратным током).

2) Влияние неравенства сопротивлений плюсовых участков генераторных цепей ($U_{10} = U_{20}$, $R_{1-} = R_{2-}$, $R_{1+} \neq R_{2+}$).

В условиях эксплуатации не исключена возможность нарушения неравенства сопротивлений этих участков по следующим причинам:

а) в результате ухудшения состояния контактных соединений одного из участков в местах присоединения провода к шине, к шунту амперметра или к контактам реле обратного тока;

б) в результате увеличения переходного сопротивления контактов контактора реле обратного тока при загрязнении, окислении или обгорании контактных поверхностей.

Ввиду того что сопротивления проводов для систем, рассчитанных на большие токи, чрезвычайно малы и обычно измеряются тысячными долями ома, всякое ухудшение состояния контактных соединений может привести к значительной разности между сопротивлениями отмеченных выше участков согласно фиг. 7.5.

При разомкнутой цепи уравнительных обмоток для схемы фиг. 7.5 справедливо следующее равенство:

$$I'_1 R_{1+} = I'_2 R_{2+}, \quad (7.29)$$

так как $U_{10} = U_{20}$, $R_{1-} = R_{2-} = R_-$.

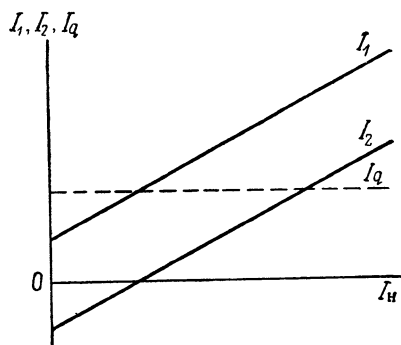
Величина поперечного тока

$$I_{q0} = -\frac{I_n}{2} \frac{R_{1+} - R_{2+}}{R_{1+} + R_{2+}}. \quad (7.30)$$

При замкнутой цепи уравнительных обмоток величина поперечного тока определяется из выражения (7.19)

$$I_q = -\frac{1}{2} I_n \frac{(R_{1+} - R_{2+})(2R_- + 2R_y)}{(R_{1+} + R_{2+})(2R_- + 2R_y) + 4\alpha R_-}. \quad (7.31)$$

Величина поперечного тока I_q для рассматриваемого случая находится в линейной зависимости от тока нагрузки, и, следовательно, при параллельной работе распределение нагрузки между генераторами характеризуется прямыми, изображенными на фиг. 7.9 для случая $R_{1+} > R_{2+}$.



Фиг. 7.8. Распределение нагрузки между параллельно работающими генераторами при $U_{10} > U_{20}$; $R_{1+} = R_{2+}$; $R_{1-} = R_{2-}$.

Величина поперечного тока I_q при включенной уравнивающей цепи меньше, чем при отключенной уравнивающей цепи, так как

$$I_q = I_{q0} \frac{1}{1 + \frac{2aR_-}{(R_y + R_-)(R_{1+} + R_{2+})}}. \quad (7.32)$$

При отсутствии уравнивающей цепи

$$I'_1 = \frac{U_{10} - U}{R_{1+}}; \quad (7.33)$$

$$I'_2 = \frac{U_{20} - U}{R_{2+}}; \quad (7.34)$$

$$I'_1 : I'_2 = R_{2+} : R_{1+}. \quad (7.35)$$

При отсутствии уравнивающей цепи нагрузка генераторов распределяется обратно пропорционально сопротивлениям положительных участков генераторных цепей.

При включенной уравнивающей цепи

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{I_H}{2} + I_q}{\frac{I_H}{2} - I_q} = \frac{R_{2+} + \frac{aR_-}{R_- + R_y}}{R_{1+} + \frac{aR_-}{R_- + R_y}}, \quad (7.36)$$

т. е. как и при отсутствии уравнивающей цепи $I_1 < I_2$, но отношение токов в меньшей степени зависит от отношения сопротивления положительных участков генераторных цепей.

При этом ток, протекающий по уравнивающей цепи, согласно выражению (7.14)

$$i_y = \frac{I_1 R_{1-} - I_2 R_{2-}}{R_{1-} + R_{2-} + 2R_y} = \frac{R_- (I_1 - I_2)}{2(R_- + R_y)} < 0.$$

Так как при выводе выражения (7.19) для I_q полагалось, что

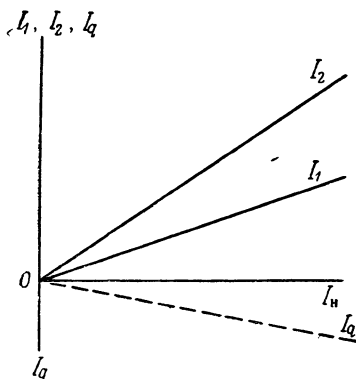
$$U_1 = U_{10} - ai_y,$$

$$U_2 = U_{20} + ai_y,$$

то в рассматриваемом случае напряжение менее нагруженного генератора (первого) увеличивается ($i_y < 0$, $U_1 = E_1 + ai_y$), а напряжение второго, более нагруженного, генератора уменьшается. Таким образом, влияние неравенства сопротивлений положительных участков генераторных цепей на распределение нагрузки между параллельно включенными генераторами по схеме фиг. 7.5 относительно невелико благодаря эффективному выравнивающему действию уравнивающих обмоток регуляторов напряжения.

3) Влияние неравенства сопротивлений отрицательных участков генераторных цепей (балластных сопротивлений) ($U_{10} = U_{20}$, $R_{1+} = R_{2+}$, $R_{1-} \neq R_{2-}$).

Для равномерного распределения нагрузки между генераторами равной мощности при параллельной работе наряду с другими условиями



Фиг. 7.9. Распределение нагрузки между параллельно работающими генераторами при $U_{10} = U_{20}$; $R_{1+} \neq R_{2+}$; $R_{1-} = R_{2-}$.

требуется также выполнение условия равенства балластных сопротивлений.

Это важное условие, однако, может быть при эксплуатации нарушено вследствие ухудшения контакта в месте присоединения минусового провода одного из генераторов к шине (или к массе самолета) в результате ослабления зажима и окисления соприкасающихся поверхностей.

Разность балластных сопротивлений 6—10% от нормального значения может возникнуть также в результате неодинаковых условий нагрева или охлаждения минусовых проводов.

Влияние неравенства балластных сопротивлений на распределение нагрузки между генераторами равной мощности можно определить с помощью аналитического выражения для поперечного тока (7.19) в зависимости от соотношения параметров системы и величины тока нагрузки:

$$I_q = -\frac{1}{2} I_n \frac{2\alpha (R_{1-} - R_{2-})}{2R_+ (2R_y + R_{1-} + R_{2-}) + 2\alpha (R_{1-} + R_{2-})}. \quad (7.37)$$

Из последнего выражения следует, что величина поперечного тока находится в линейной зависимости от тока нагрузки, и, следовательно, характер распределения нагрузки между генераторами определяется прямыми, изображенными на фиг. 7.10 для $R_{1-} > R_{2-}$.

Необходимо отметить, что при соответственно одинаковом неравенстве участков генераторных цепей, т. е. при $R_{1+} - R_{2+} = R_{1-} - R_{2-}$, величина поперечного тока при неравенстве отрицательных участков значительно больше, чем при неравенстве положительных участков, так как $\alpha \gg 2(R_y + R_-)$.

При разомкнутой уравнивающей цепи неравенство сопротивлений отрицательных участков генераторных цепей, как видно из схемы фиг. 7.8, не оказывает влияния на распределение нагрузки, $I_q = 0$.

При замкнутой цепи уравнивающих обмоток появляется поперечный ток, величина которого определяется выражением (7.37).

Если $R_{1-} > R_{2-}$, то

$$I_1 = \frac{I_n}{2} + I_q < \frac{I_n}{2} - I_q = I_2.$$

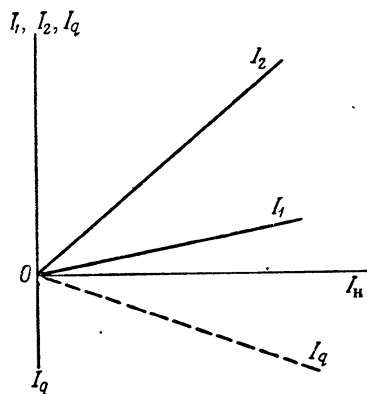
При этом $I_1 R_{1-} > I_2 R_{2-}$, так как

$$\begin{aligned} I_1 R_{1-} - I_2 R_{2-} &= \frac{I_n}{2} [R_{1-} - R_{2-}] \times \\ &\times \left[\frac{2R_+ (2R_y + R_{1-} + R_{2-})}{2R_+ (2R_y + R_{1-} + R_{2-}) + 2\alpha (R_{1-} + R_{2-})} \right] > 0. \end{aligned} \quad (7.38)$$

Если $I_1 R_{1-} > I_2 R_{2-}$, то, как это следует из выражения (7.14),

$$i_y = \frac{I_1 R_{1-} - I_2 R_{2-}}{2R_y + R_{1-} + R_{2-}} > 0. \quad (7.39)$$

Таким образом, по уравнивающей цепи протекает ток такого направления, при котором напряжение первого, менее нагруженного, гене-



Фиг. 7.10. Распределение нагрузки между параллельно работающими генераторами при $U_{10} = U_{20}$; $R_{1+} = R_{2+}$; $R_{1-} \neq R_{2-}$.

ратора понижается, а напряжение второго генератора, более нагруженного, повышается:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U_{10} - \alpha i_y; \\ U_2 &= U_{20} + \alpha i_y. \end{aligned} \right\} \quad (7.40)$$

Уравнительные обмотки при неравенстве балластных сопротивлений не только не способствуют равномерному распределению нагрузки между параллельно работающими генераторами, а наоборот, распределение нагрузки в этом случае становится более неравномерным, чем при разомкнутой уравнительной цепи.

Так как балластные сопротивления для систем, рассчитанных на большие нагрузки, весьма малы, то всякое ухудшение состояния контактных соединений между шиной или массой самолета и минусовым выводом одного из генераторов может привести к существенной разности этих сопротивлений, т. е. к значительной неравномерности распределения тока между генераторами при больших нагрузках сети.

Приведенный анализ параллельной работы самолетных генераторов, снабженных регуляторами напряжения, показывает, что для равномерного распределения нагрузки между генераторами необходимо по возможности точнее соблюдать равенство сопротивлений одноименных участков генераторных цепей и напряжений настройки регуляторов напряжения.

При параллельной работе генераторов, снабженных угольными регуляторами напряжения, уравнительная цепь которых включена между отрицательными зажимами генератора, необходимо строгое соблюдение равенства балластных сопротивлений.

4) Влияние характеристик регуляторов напряжения параллельно работающих генераторов на распределение нагрузки.

Одной из основных причин ненормальной работы электрической системы, как было отмечено выше, является несоответствие характеристик регуляторов напряжения генераторов, предназначенных для параллельной работы.

Наиболее подходящими для параллельной работы с точки зрения равномерного распределения нагрузки являются регуляторы, обеспечивающие неизменное по величине напряжение в пределах всего диапазона изменения скорости вращения генераторов, т. е. $U=f(n)=\text{const}$, т. е. астатические регуляторы.

Полагая, что скорости вращения авиадвигателей при нормальном полете примерно одинаковы и изменяются почти одновременно, можно допустить установку регуляторов напряжения, поддерживающих $U=f(n) \neq \text{const}$, если изменение величины напряжения на всем диапазоне изменения скорости вращения не выходит за допустимые пределы ($\pm 0,5$ в). При этом необходимо, чтобы характеристики регуляторов, предназначенных для совместной работы, были аналогичными (с одинаковым статизмом), а не расходящимися, так как в последнем случае распределение нагрузки при параллельной работе генераторов будет неравномерным. При расходящихся характеристиках равномерное распределение нагрузки между генераторами возможно лишь при такой скорости вращения, при которой производилась настройка регуляторов на равные напряжения.

Эксплуатационная особенность схемы параллельной работы генераторов (фиг. 7.5) состоит в том, что при отключении одного из генераторов от сети необходимо размыкать уравнительную цепь. В противном случае напряжение работающего генератора под воздействием уравни-

тельной обмотки будет понижаться, так как уравнительная цепь стремится понизить напряжение более нагруженного генератора и повысить напряжение генератора менее нагруженного. В данном случае ток нагрузки второго генератора равен нулю и уравнительная цепь снизит напряжение включенного генератора на максимально возможную величину.

§ 7.5. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА НЕСКОЛЬКИХ ГЕНЕРАТОРОВ, СНАБЖЕННЫХ РЕГУЛЯТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЯ

На многомоторных самолетах обычно устанавливаются четыре, шесть и даже более генераторов одинаковой мощности, работающих параллельно на общую сеть. В этом случае напряжение каждого из генераторов должно поддерживаться постоянным с помощью своего автоматического регулятора напряжения, снабженного уравнительной обмоткой. Совершенно очевидно, что для равномерного распределения всей нагрузки между n генераторами одинаковой мощности, при симметричном включении их на параллельную работу, необходимо выполнение условий, аналогичных условиям параллельной работы двух генераторов, а именно:

а) чтобы $U_{10}, U_{20}, U_{30}, \dots, U_{n0}$ — напряжения генераторов, поддерживаемые регуляторами напряжения, до включения на параллельную работу были равны, т. е.

$$U_{10} = U_{20} = U_{30} = \dots = U_{n0}; \quad (7.41)$$

б) чтобы сопротивления последовательных обмоток максимальных и минимальных реле, проводов и контакторов $-R_{1+}, R_{2+}, R_{3+}, \dots, R_{n+}$, соединяющих плюсовые зажимы соответствующих генераторов со сборной шиной, и сопротивления цепей $-R_{1-}, R_{2-}, R_{3-}, \dots, R_{n-}$, соединяющих отрицательные зажимы генераторов с отрицательной общей шиной или с корпусом самолета, были одинаковы, т. е.

$$\left. \begin{aligned} R_{1+} &= R_{2+} = R_{3+} = \dots = R_{n+}; \\ R_{1-} &= R_{2-} = R_{3-} = \dots = R_{n-}; \end{aligned} \right\} \quad (7.42)$$

в) чтобы сопротивления соответствующих уравнительных обмоток и уравнительных проводов были также одинаковыми:

$$r_1 = r_2 = r_3 = \dots = r_n. \quad (7.43)$$

Однако в действительности соблюсти в точности все эти условия не представляется возможным, потому что всегда имеет место расстройка регуляторов напряжения или неравенство сопротивлений проводов, соединяющих зажимы генераторов с общими шинами. Все это приводит к неравномерному распределению нагрузки между генераторами.

На фиг. 7.11 приведена схема включения n генераторов постоянного тока на параллельную работу, получившая наибольшее распространение на самолетах.

В общем случае при неравенстве напряжений генераторов, на которые настроены регуляторы, до включения их на параллельную работу, т. е. при

$$U_{10} \neq U_{20} \neq U_{30} \neq \dots \neq U_{n0}, \quad (7.44)$$

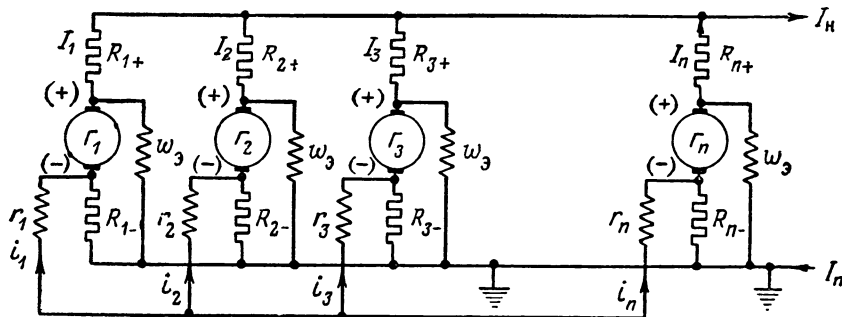
при неравенстве сопротивлений всех соединительных проводов как плюсовых, так и минусовых плеч, т. е. при

$$\left. \begin{aligned} R_{1+} &\neq R_{2+} \neq R_{3+} \dots \neq R_{n+}, \\ R_{1-} &\neq R_{2-} \neq R_{3-} \dots \neq R_{n-}, \end{aligned} \right\} \quad (7.45)$$

и при неодинаковых сопротивлениях цепей уравнительных обмоток

$$r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq \dots \neq r_n \quad (7.46)$$

распределение общей нагрузки между генераторами можно найти путем решения $2n$ уравнений относительно токов генераторов $-I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ и уравнительных токов $i_1, i_2, i_3, \dots, i_n$.



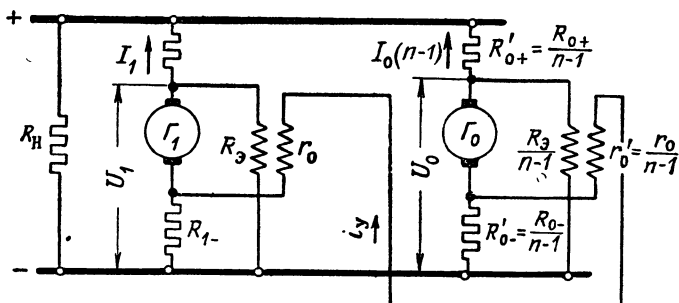
Фиг. 7.11. Упрощенная принципиальная схема параллельной работы n генераторов, снабженных угольными регуляторами напряжения.

Практически наибольший интерес представляет не общее решение вопроса, а частный случай: когда $U_{20} = U_{30} = \dots = U_{n0} = U_0$, а $U_{10} > U_0$. При этом генератор, имеющий несколько повышенное напряжение, может недопустимо перегрузиться, в то время как остальные генераторы будут работать с недогрузкой.

Если принять, что

$$\left. \begin{aligned} U_{20} = U_{30} = \dots = U_{n0} = U_0, \quad U_{10} > U_0; \\ R_{2-} = R_{3-} = \dots = R_{n-} = R_{0-}; \quad R_{1-} \neq R_{0-}; \\ R_{2+} = R_{3+} = \dots = R_{n+} = R_{0+}; \quad R_{1+} \neq R_{0+}, \end{aligned} \right\} \quad (7.47)$$

то распределение нагрузки в такой системе можно найти, исследуя вместо схемы фиг. 7.11 схему, приведенную на фиг. 7.12, т. е. рас-



Фиг. 7.12. Упрощенная принципиальная схема параллельной работы двух генераторов различных мощностей.

считывая параллельную работу n генераторов как работу двух генераторов различной мощности: одного генератора с напряжением настройки U_{10} , током I_1 , сопротивлениями плюсового и минусового плеч R_{1+} и R_{1-} , сопротивлением уравнительной обмотки $r_1 = r_0$ и $a_1 = a_0 = R_s \frac{\omega_y}{\omega_s}$ и другого генератора с мощностью в $(n-1)$ раз больше, чем первого, с напряжением настройки U_{00} , током I'_0 в $(n-1)$ раз

больше, чем ток одного из $n-1$ генераторов $I_0 (I'_0 = I_0 (n-1))$, сопротивлениям плеч плюсовой и минусовой цепей, соответственно равными $R'_{0+} = \frac{R_{0+}}{n-1}$ и $R'_{0-} = \frac{R_{0-}}{n-1}$, сопротивлением уравнивающей обмотки $r'_0 = \frac{r_0}{n-1}$ и $R'_s = \frac{R_s}{n-1}$.

Для астатической настройки регуляторов уравнения, характеризующие распределение нагрузки, имеют вид

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U_{10} - \alpha i_y; \\ U_0 &= U_{00} + \frac{\alpha}{n-1} i_y, \end{aligned} \right\} \quad (7.48)$$

где

$$\alpha = R_s \frac{w_y}{w_s}, \quad (7.49)$$

$$U_1 - U_0 = I_1 R_{1+} - I_0 (n-1) \frac{R_{0+}}{n-1}, \quad (7.50)$$

$$i_y \left(r_0 + \frac{r_0}{n-1} \right) - (I_1 - i_y) R_{1+} + [I_0 (n-1) + i_y] R_{0-} \frac{1}{n-1} = 0. \quad (7.51)$$

Вводя поперечный ток I_Q , характеризующий небаланс токов,

$$I_1 = \frac{I_H}{n} + I_Q, \quad (7.52)$$

$$(n-1) I_0 = \frac{I_H}{n} (n-1) - I_Q, \quad (7.53)$$

$$I_Q = \frac{I_H (n-2)}{2n} + \frac{I_1}{2} - \frac{(n-1) I_0}{2}, \quad (7.54)$$

из уравнений (7.50), (7.52), (7.54) можно найти величину I_Q :

$$\begin{aligned} I_Q &= \frac{(U_{10} - U_{00}) [r_0 n + R_{1-} (n-1) + R_{0-}] (n-1)}{[r_0 n + R_{1-} (n-1) + R_{0-}] [R_{1+} (n-1) + R_{0+}] + \alpha n [R_{1-} (n-1) + R_{0-}]} - \\ &- \frac{I_H}{n} \frac{[R_{1+} - R_{0+}] [r_0 n + R_{1-} (n-1) + R_{0-}]}{[r_0 n + R_{1-} (n-1) + R_{0-}] [R_{1+} (n-1) + R_{0+}] + \alpha n [R_{1-} (n-1) + R_{0-}]} - \\ &- I_H \frac{\alpha [R_{1-} - R_{0-}]}{[r_0 n + R_{1-} (n-1) + R_{0-}] [R_{1+} (n-1) + R_{0+}] + \alpha n [R_{1-} (n-1) + R_{0-}]} . \end{aligned} \quad (7.55)$$

Для того чтобы $I_Q = 0$, т. е. для того чтобы нагрузка распределялась между генераторами пропорционально их номинальным мощностям, необходимо, чтобы величины сопротивлений участков цепей от зажимов генераторов до плюсовых и минусовых шин выбирались обратно пропорционально мощностям соответствующих генераторов. Действительно, $I_Q = 0$ при $U_{10} = U_{00}$ и при $R_{1+} = R_{0+}$ и $R_{1-} = R_{0-}$. Это и означает, что

$$\frac{R_{1+}}{R_{0+}} = \frac{R_{1-}}{R_{0-}} = \frac{P'_0}{P_0} = n-1. \quad (7.56)$$

При двух параллельно работающих генераторах одинаковой мощности P_0 , при $R_{1+} = R_{0+}$; $R_{1-} = R_{0-}$, величина поперечного тока равна

$$I_Q = \frac{(U_{10} - U_{00})(r_0 + R_{0-})}{2 [(r_0 + R_{0-}) R_{0+} + \alpha R_{0-}]} . \quad (7.57)$$

При n параллельно работающих генераторах каждый мощностью P_0 при тех же условиях

$$I_Q = \frac{(U_{10} - U_{00})(r_0 + R_{0-})}{[(r_0 + R_{0-})R_{0+} + \alpha R_{0-}] \frac{n-1}{n}}; \quad (7.58)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{I_Q}{I_q} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(n-1)}{n} = 2. \quad (7.59)$$

Таким образом, величина поперечного тока при параллельной работе n генераторов одинаковой мощности P_0 не может быть больше удвоенного значения поперечного тока между двумя генераторами той же мощности P_0 , если они имеют одинаковую расстройку регуляторов напряжения.

Это означает, что при параллельной работе нескольких генераторов один из них может оказаться более перегруженным по сравнению со случаем допустимой перегрузки при параллельной работе только двух генераторов (при одинаковой допустимой расстройке регуляторов). Вследствие этого в системе со многими генераторами необходимо предъявлять более жесткие требования к регуляторам напряжения как с точки зрения точности их работы, так и постоянства их параметров.

Относительную перегрузку генератора можно характеризовать отношением

$$\varepsilon = \frac{I_1}{\frac{I_{ном}}{n}} = j + \frac{I_Q}{I_{ном}} n,$$

$$\text{где } j = \frac{I_n}{I_{ном}}.$$

Учитывая реальные значения параметров регуляторов, приведенные в табл. 7.1, выражение для I_Q можно упростить, пренебрегая величинами R_{0+} и R_{0-} по сравнению с r_0 и полагая $R_{0+} \approx R_{0-}$.

Таблица 7.1

Типы регулятора напряжения	Сопротивление уравнительной обмотки r_0 в ом	α_0 $\frac{\beta}{a}$	$\frac{\alpha_0}{r_0} + 1$ без учета сопротивления уравнительного провода
Вибрационные	0,033	1,3	40,4
	0,15	1,6	10,7
Угольные:			
Р-25-А	0,35	3,14	10,0
РУГ-82	0,47	3,18	7,76

В этом случае

$$I_Q = \frac{\Delta U}{R_{0+}} \frac{(n-1)}{n} \frac{1}{1+\beta} - \frac{I_n}{n^2} \frac{\Delta R_+}{R_{0+}(1+\beta)} - \frac{I_n}{n^2} \frac{\Delta R_-}{R_{0-}} \frac{\beta}{1+\beta}, \quad (7.60)$$

где

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{\alpha}{r_0}, \\ \Delta R_+ &= R_{1+} - R_{0+}, \\ \Delta R_- &= R_{1-} - R_{0-}, \\ \Delta U &= U_{10} - U_{00}. \end{aligned}$$

Коэффициент перегрузки

$$\varepsilon = j + \frac{\Delta U}{R_{0+} I_{\text{ном}}} \frac{n-1}{1+\beta} - j \frac{\Delta R_+}{R_{0+}} \frac{1}{n(1+\beta)} - j \frac{\Delta R_-}{n R_{0-}} \frac{\beta}{(1+\beta)}. \quad (7.61)$$

На основании последней формулы можно определить возможную перегрузку одного из генераторов при известных величинах ΔU , ΔR_+ и ΔR_- или, наоборот, установить допустимое неравенство напряжений генераторов и сопротивлений плюсовых и минусовых цепей по заданному коэффициенту перегрузки.

Так, например, для номинальной нагрузки всех генераторов $I_n = I_{\text{ном}}$ величина $j=1$ при $n=6$ и $\beta=7$:

$$\frac{\Delta R_+}{R_{0+}} = \frac{\Delta R_-}{R_{0-}} = -0,1 \text{ и } R_{0+} \frac{I_{\text{ном}}}{n} = 0,5,$$

получают

$$\varepsilon = 1 + \frac{\Delta U}{0,5 \cdot 6} \frac{5}{8} + \frac{0,1}{6} = 1 + \frac{10\Delta U + 0,8}{48},$$

при $\Delta U=1$ в $\varepsilon=1,26$, а при $\Delta U=2$ в $\varepsilon=1,435$.

Последний пример показывает, что при указанных расстройках в системе шести генераторов нельзя получить от системы номинальной мощности, равной суммарной мощности всех шести генераторов, так как в этом случае один из них работает с перегрузкой и сравнительно быстро выйдет из строя. Для рассматриваемого примера при $\Delta U=1$ в со всех генераторов можно получить только 77,5% всей мощности, так как при $\varepsilon=1$ $j=0,775$.

Собственно поэтому в системах со многими генераторами, как было уже указано выше, и требуется большая точность работы регуляторов напряжения, так как это ведет к более эффективному использованию энергосистемы.

§ 7.6. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ГЕНЕРАТОРА С АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕЕЙ

Изложенная выше теория параллельной работы генераторов постоянного тока может быть распространена на случай параллельной работы генераторов с любым другим источником постоянного тока, например, аккумуляторной батареей или выпрямительным агрегатом.

Общие условия для возможности параллельной работы генератора с аккумуляторной батареей остаются теми же, что и в предыдущем случае, а именно:

- 1) равенство напряжений обоих источников в момент приключения;
- 2) соблюдение правильной полярности при присоединении к сборным шинам.

На современных самолетах контроль за выполнением этих условий осуществляется автоматически посредством минимального реле, принцип действия которого изложен в главе VIII.

На фиг. 7.13 изображена схема соединений для параллельной работы генератора с аккумуляторной батареей. Если обозначить через U_n , I_r и r_r соответственно напряжение (между плюсовым зажимом генератора и массой), ток и сопротивление участка цепи, подводящей ток от плюса генератора к положительной шине, а через $E_{\text{акк}}$, $I_{\text{акк}}$ и $r_{\text{акк}}$ э. д. с., ток и сопротивление всей цепи аккумулятора (между положительной

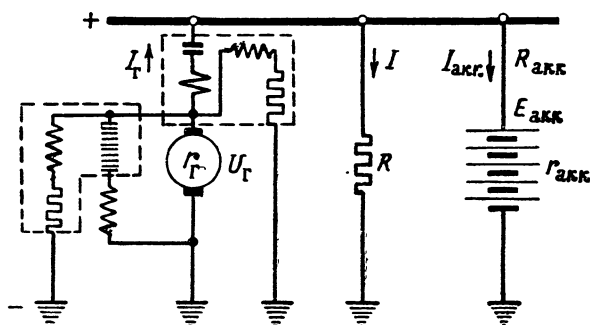
шиной и массой), то для случая разряда аккумуляторной батареи можно написать $I = I_r + I_{акк}$, а напряжение на сборных шинах ¹

$$U = U_r - I_r r_r = U_{акк} - I_{акк} r_{акк}, \quad (7.62)$$

где U — напряжение на шинах, а I — ток во внешней цепи (ток нагрузки). Тогда разность между напряжением генератора и э. д. с. аккумулятора

$$\Delta U = U_r - E_{акк} = I r_r - I_{акк} (r_r + r_{акк}). \quad (7.63)$$

В случае параллельной работы аккумуляторной батареи с генератором, снабженным регулятором напряжения, можно принять $\Delta U = \text{const}$, тогда из последней формулы следует, что $I_{акк}$ должен уменьшаться с уменьшением тока нагрузки.



Фиг. 7.13. Схема соединений для параллельной работы генератора с аккумуляторной батареей.

При $\Delta U = \text{const}$ может оказаться, что по мере уменьшения внешней нагрузки величина $I r_r$ сначала делается равной ΔU , а затем достигнет значения, меньшего ΔU . При достижении $I r_r = \Delta U$ аккумуляторная батарея будет работать вхолостую, так как ток ее получается равным нулю; при $I r_r < \Delta U$ ток аккумулятора становится отрицательным, и генератор начинает работать как на нагрузку, так и на заряд аккумуляторной батареи, ибо отрицательное значение $I_{акк}$ соответствует заряду аккумуляторной батареи.

Если предположить теперь, что ток нагрузки остается постоянным, $I = \text{const}$, а изменяются напряжение генератора U_r и э. д. с. батареи $E_{акк}$, то ток аккумуляторной батареи и его направление будут находиться в зависимости от значения $(U_r - E_{акк} I r_r)$. Анализ формулы (7.63) показывает, что при $E_{акк} > U_r$, т. е. когда $\Delta U < 0$, ток аккумуляторной батареи $I_{акк}$ всегда приобретает положительное значение, т. е. наступает разряд аккумуляторной батареи. Легко понять, что переход аккумулятора из состояния заряда в разрядный режим наступает при $U_r = E_{акк} + I r_r$.

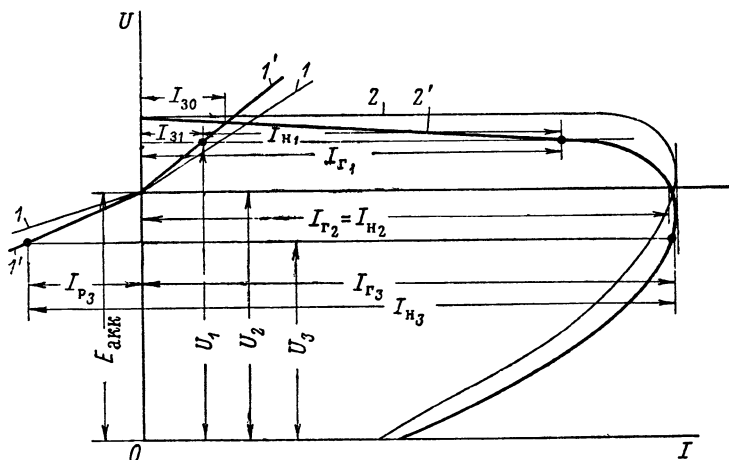
Для того чтобы выяснить распределение токов при параллельной работе генератора с аккумуляторной батареей, необходимо сопоставить внешние характеристики аккумуляторной батареи и генератора, работающего с регулятором напряжения. Эти характеристики приведены на диаграмме фиг. 7.14.

Для удобства графических построений внешняя характеристика аккумуляторной батареи повернута относительно оси ординат на 180° , т. е. ток заряда батареи принят положительным, а ток разряда отрица-

¹ При совместной работе аккумуляторной батареи с генератором за положительное направление принято направление тока от аккумуляторной батареи в сеть (разряд аккумулятора).

тельным (кривая 1). Если генератор снабжен регулятором напряжения, имеющим астатическую настройку, то внешняя характеристика в большом диапазоне изменения тока нагрузки будет параллельна оси абсцисс (кривая 2). Так как провода, соединяющие генератор и аккумулятор со сборными шинами, имеют некоторое сопротивление, то необходимо учесть падение напряжения в этих сопротивлениях.

На фиг. 7.14 внешние характеристики аккумулятора и генератора с учетом падения напряжения в соединительных проводах изображены жирной линией (кривые 1' и 2'). Так как аккумулятор и генератор подключены к одним и тем же сборным шинам, то при всех режимах работы напряжение аккумулятора должно быть равно напряжению генера-



Фиг. 7.14. Внешние характеристики генератора и аккумуляторной батареи с учетом падения напряжения в проводах.

тора. Пусть напряжение на сборных шинах $U = U_r = U_{акк}$, а нагрузка в сети равна нулю (проводимость внешней цепи равна нулю). Тогда при $U_r > E_{акк}$ будет иметь место заряд аккумулятора током I_{30} . При этом ток нагрузки генератора $I_{Г0}$ равен току заряда I_{30} .

По мере увеличения проводимости внешней цепи возрастает ток нагрузки и вместе с тем растет ток генератора, напряжение же на сборных шинах и ток заряда аккумулятора уменьшаются. Так, если напряжение на сборных шинах становится равным U_1 , то ток заряда аккумулятора оказывается равным $I_{31} < I_{30}$ (фиг. 7.14), а ток генератора $I_{Г1}$ равен в этом случае сумме зарядного тока аккумулятора и тока нагрузки $I_r = I_{Н1} + I_{31}$.

При дальнейшем увеличении нагрузки (увеличении проводимости внешней цепи) ток генератора продолжает расти, а ток заряда аккумулятора уменьшаться, и при некотором напряжении на сборных шинах U_2 , равном э. д. с. аккумулятора $E_{акк}$, ток заряда аккумулятора становится равным нулю. В этом случае весь ток генератора I_r идет в нагрузку ($I_{Г2} = I_{Н2}$).

При еще большем увеличении проводимости внешней цепи ток аккумулятора меняет свой знак, т. е. аккумулятор переходит в режим разряда. Ток в нагрузке становится теперь равным не разности, а сумме токов генератора и аккумулятора. Так, например, при напряжении U_3 ток в нагрузке $I_{Н3}$ равен сумме токов генератора $I_{Г3}$ и аккумулятора $I_{Р3}$:

$$I_{Н3} = I_{Г3} + I_{Р3}.$$

Таким образом, можно прийти к тому же выводу, который был сделан раньше, а именно: по мере увеличения нагрузки (проводимости внешней цепи) генератор сначала начинает разгружаться от зарядного тока и все в большей мере отдавать ток во внешнюю цепь. При дальнейшем увеличении проводимости внешней цепи напряжение генератора, понижаясь, оказывается равным э. д. с. аккумулятора. При этом зарядный ток становится равным нулю, и весь ток генератора целиком отдается во внешнюю цепь. Это соответствует работе аккумулятора вхолостую.

При еще большем увеличении проводимости внешней цепи U_r становится меньше $E_{\text{акк}}$, наступает разряд аккумуляторной батареи, т. е. начинает нагружаться и аккумулятор, как бы помогая генератору покрывать нагрузку во внешней цепи, причем доля участия аккумулятора в отдаче тока во внешнюю цепь увеличивается с уменьшением напряжения U_r .

При снижении напряжения генератора соответствующей настройкой регулятора напряжения можно заставить аккумулятор отдавать ток во внешнюю цепь и при меньших значениях нагрузки. Однако, очевидно, это будет вызывать больший разряд аккумулятора.

Если аккумуляторная батарея работает параллельно на общие шины с двумя или несколькими генераторами, то независимо от числа присоединенных генераторов напряжение на общих шинах получается одним и тем же, равным

$$U = U_{\text{акк}} = E_{\text{акк}} - I_{\text{акк}} r_{\text{акк}} = U_{r1} - I_{r1} r_{r1} = U_{r2} - I_{r2} r_{r2} = \dots = U_{rn} - I_{rn} r_{rn}$$

Отсюда ясно, что все сказанное выше для случая параллельной работы одного генератора с аккумуляторной батареей в отношении условий, при которых наступает заряд или разряд аккумулятора, и о распределении тока нагрузки между батареей и генератором остается справедливым и для данного случая, так как в основном это зависит от внешних характеристик аккумуляторной батареи и величины напряжения на общих шинах. Суммарный ток всех параллельно работающих генераторов можно найти, как и для одного генератора, по формуле

$$\sum_{k=1}^n I_{rk} = I \pm I_{\text{акк}}$$

в зависимости от того, заряжается или разряжается аккумуляторная батарея, а ток аккумулятора

$$I_{\text{акк}} = \frac{E_{\text{акк}} - U}{r_{\text{акк}}},$$

где $r_{\text{акк}}$ — сопротивление цепи аккумулятора.

Распределение тока между генераторами определяется условиями, установленными ранее.

§ 7.7. ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ЗАРЯЖЕННОСТИ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

Влияние степени заряженности аккумуляторной батареи на распределение тока между генератором и аккумулятором проще всего уяснить из рассмотрения внешних характеристик, изображенных на фиг. 7.15.

Здесь приведены внешние характеристики генератора для определенной скорости вращения без учета падения напряжения в соединительных проводах, и аккумуляторов, полностью заряженного и разряженного (с небольшой остаточной емкостью).

Пусть напряжение снизилось на величину ΔU , тогда в случае разряженного аккумулятора его разрядный ток равен $I_{\text{акк.р.}}$, а ток, отдаваемый генератором во внешнюю цепь, равен I_r . В сумме эти токи соответствуют току нагрузки I .

Если бы аккумулятор имел большую остаточную емкость, т. е. находился бы в более заряженном состоянии, то для него $E_{\text{акк2}} > E_{\text{акк1}}$, и характеристика его имела бы менее падающий характер. Очевидно, что в этом случае ту же самую нагрузку I можно было бы получить при более высоком напряжении за счет увеличения разрядного тока и уменьшения тока генератора. Отсюда следует, что если аккумуляторная батарея, работающая параллельно с генератором, находится в более заряженном состоянии, то при тех же самых нагрузках во внешней цепи падение напряжения на общих шинах уменьшается и вместе с тем при $U_r = U$ получается меньший зарядный ток.

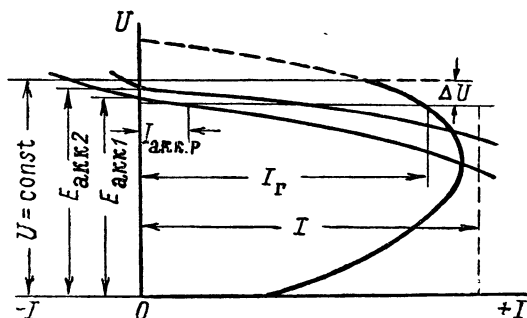
Как правило, самолетные генераторы работают в основном в диапазоне более высоких скоростей, т. е. предельные токи их $I_{\text{п.ог}}$ достаточно велики. Поэтому можно считать, что если путем настройки регулятора установить некоторое определенное напряжение U_r , то оно будет поддерживаться постоянным как при нормальном режиме работы, так и при достаточно больших перегрузках (обычно кратковременных).

Только при очень больших перегрузках, как, например, при коротких замыканиях или при пуске в ход отдельных агрегатов, потребляющих значительные токи, напряжение снижается. При перегрузках подобного рода вступает в действие аккумуляторная батарея и тем раньше, чем она лучше заряжена.

Однако аккумуляторная батарея предназначена не только для совместной работы с самолетным генератором для покрытия пиков нагрузки, но и как резервный источник тока, т. е. на нее возлагается обязанность обеспечивать током все самолетные установки или наиболее ответственные из них, в случае если авиационный двигатель, приводящий во вращение генератор, не работает или генератор по каким-либо причинам вышел из строя. В этом случае вся нагрузка падает на аккумуляторную батарею, и ясно, что обеспечение энергией будет тем более надежным, чем более полно заряжена аккумуляторная батарея. Поэтому в полете надо создавать такие условия, чтобы аккумуляторная батарея не только разряжалась возможно меньше, но и по возможности подзаряжалась, для чего регулятор напряжения необходимо настраивать так, чтобы поддерживаемое им постоянное напряжение было выше э. д. с. аккумуляторной батареи.

Даже при том условии, что аккумуляторная батарея ставится на самолет в полностью заряженном состоянии, все же регулятор напряжения настраивают так, чтобы $U_r > E_{\text{акк}}$, с целью не допускать сильной разрядки аккумуляторной батареи.

Аналогичные соображения могут быть высказаны и для того случая, когда приходится принимать во внимание падение напряжения в



Фиг. 7.15. Внешние характеристики генератора и полностью заряженного и разряженного аккумуляторов.

соединительных проводах между генератором и сборными шинами, с той только разницей, что все ранее сделанные замечания следует относить не к напряжению на зажимах генератора U_r , а к напряжению на сборных шинах. Так как последнее в данном случае зависит от нагрузки генератора, то настройку регулятора напряжения следует производить так, чтобы поддерживаемое при помощи него постоянное напряжение на зажимах генератора U_r обеспечивало желательные значения напряжения на сборных шинах при заданных нагрузках. Естественно, что в рассматриваемом случае напряжение на зажимах генератора должно поддерживаться более высоким.

С другой стороны, U_r следует устанавливать в зависимости от состояния аккумуляторной батареи. Если генератор по каким-либо причинам вынужден работать параллельно с полуразряженным аккумулятором, то при этом получается чрезмерно большой зарядный ток. Вследствие этого преждевременно наступает вскипание электролита, что неблагоприятно влияет на процесс зарядки.

Однако по мере зарядки аккумулятора зарядный ток его при постоянном приложенном напряжении уменьшается за счет увеличения $E_{\text{акк}}$ и крутизны внешней характеристики. Поэтому если построить кривую процесса заряда аккумулятора при $U = \text{const}$, то начальный зарядный ток равен $I_{\text{акк } 30}$ (фиг. 7.16), а затем этот ток постепенно снижается. Вначале спадание зарядного тока происходит быстро, и начальная зарядка более сильным током, чем это рекомендуется, может даже и не привести к преждевременному закипанию электролита.

Площадь, ограниченная осями координат и кривой на фиг. 7.16, определяет количество электричества или емкость Q , полученную аккумулятором при заряде за время t .

Если производить зарядку аккумулятора при постоянном напряжении, то прирост емкости аккумулятора зависит от остаточной емкости аккумулятора, температуры электролита и продолжительности заряда. Прирост емкости, выраженный в процентах, может быть с достаточным приближением вычислен по формуле В. С. Кулебакина

$$\Delta q \% = [30 - 0,17q_{\text{ост}} \%] \frac{25 + \vartheta}{50} \sqrt{t}, \quad (7.64)$$

где t — время заряда в часах, причем $t \leq 3$;

$q_{\text{ост}} \%$ — так называемая остаточная емкость, т. е. та емкость, которую имел аккумулятор перед зарядом, в процентах от его номинальной емкости;

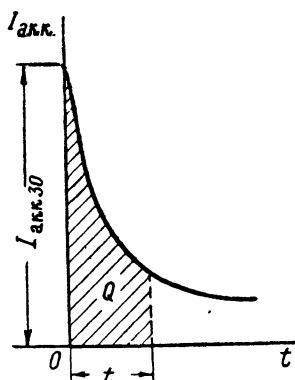
ϑ — температура электролита ($\vartheta \geq -25^\circ \text{C}$).

Анализ этой формулы показывает, что в течение одного и того же промежутка времени увеличение емкости аккумулятора при заряде будет большим, если аккумулятор находился в более разряженном состоянии, т. е. имел меньшую остаточную емкость. Если заряд при постоянном напряжении производится в течение одного и того же промежутка времени, то более разряженный аккумулятор хотя и получает большее относительное увеличение емкости $\Delta q \%$, чем заряженный, но его полная емкость оказывается все-таки меньше, чем у заряженного, т. е. $\Delta q_p > \Delta q_z$, но $q_z > q_p$. Это легко видеть также из кривых на фиг. 7.17, где изображены кривые изменения емкости аккумуляторов при заряде при постоянном напряжении для разряженного аккумулятора (индекс «р») и заряженного (индекс «з»).

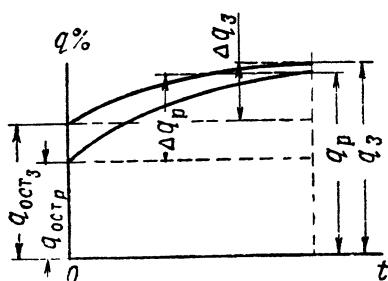
При одних и тех же условиях зарядки аккумулятора на самолете аккумулятор, имевший большую остаточную емкость, всегда будет иметь большую полную емкость, но при заряде получает меньшую дополни-

тельную емкость, чем более заряженный аккумулятор. Вместе с тем более заряженный аккумулятор и меньше разряжается при той же емкости, отдаваемой им во внешнюю цепь.

Все сказанное выше приводит к тому, что на самолет всегда следует устанавливать аккумулятор в полностью заряженном состоянии.



Фиг. 7.16. Изменение величины зарядного тока аккумулятора при $U = \text{const}$.



Фиг. 7.17. Кривые изменения емкости аккумуляторов при заряде при $U = \text{const}$ для разряженного и заряженного аккумуляторов.

Для того чтобы во время полета 24-вольтовая аккумуляторная батарея успевала восстанавливать свою полную емкость, необходимо иметь напряжение сети порядка 30—32 в. Таким образом, на самолетах, оборудованных электрической системой постоянного тока с напряжением в 28—29 в, батарея на 24 в не может полностью заряжаться.

Для повышения зарядного напряжения иногда используются вольт-добавочные машины, снабженные регулятором напряжения и включаемые последовательно с сетью.



Глава VIII

ЗАЩИТА САМОЛЕТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 8.1. ЗАЩИТА ГЕНЕРАТОРОВ ОТ ОБРАТНЫХ ТОКОВ

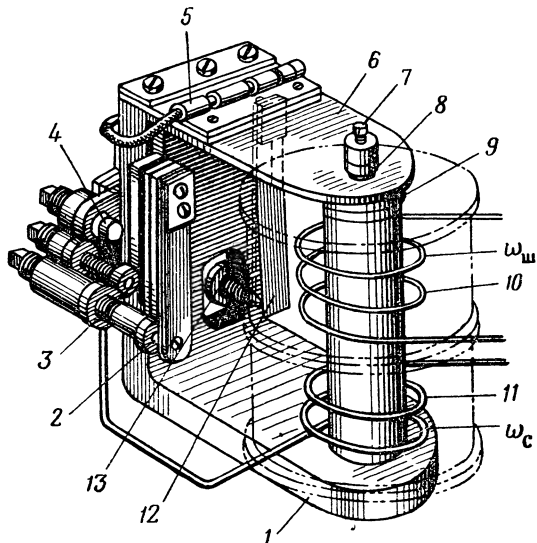
Пока авиадвигатель еще не запущен и генератор не работает, питание потребителей электрической энергии происходит от аккумуляторной батареи и генератор должен быть отключен от сети. После запуска авиадвигателя генератор должен присоединяться к сети, на которую уже работает аккумуляторная батарея, лишь в тот момент, когда напряжение на его зажимах достигает значения напряжения сети. Если при параллельной работе с аккумулятором или другими генераторами по каким-либо причинам (например, при уменьшении скорости вращения генератора) имеет место снижение электродвижущей силы генератора, то могут наступить такие условия, при которых генератор не только не будет отдавать ток во внешнюю цепь, а, наоборот, начнет потреблять электрическую энергию, перейдя на режим работы электродвигателя. Ток, протекающий при этом к генератору, носит наименование обратного тока. При появлении обратного тока необходимо отключить генератор от сети, чтобы защитить его от возможного перегрева и предохранить аккумуляторную батарею от излишнего разряда.

Для присоединения генератора к общей сети на параллельную работу с аккумулятором или другими источниками тока (генераторами, преобразователями, выпрямителями и т. п.) требуется соблюдение определенных условий, а именно — равенство напряжений и одинаковая полярность. Контроль за выполнением этих условий, а также операции по своевременному включению генератора на параллельную работу на самолетах осуществляются автоматически, посредством специального устройства, называемого реле минимального напряжения. Точно так же в самолетных генерирующих установках применяется автоматическая защита генераторов от обратных токов. В большинстве случаев выполнение функций по своевременному автоматическому включению и защите генератора от обратных токов объединяется в одном реле, принцип действия и устройство которых изложены ниже.

а) Реле минимального напряжения и обратного тока (минимальное реле). Минимальное реле состоит из контактного устройства и электромагнита с двумя обмотками на сердечнике: параллельной и последовательной. Конструкция этого реле схематически изображена на фиг. 8.1. Магнитная система реле состоит из сердечника, Г-образного остова и якоря такой же формы. Якорь крепится к остову плоской стальной пружиной. Реле имеет три пары контактов: основные, вспомогательные и для включения выравнивающей обмотки. Три подвижных контакта укреплены на якоре реле, причем главный контакт жестко закреплен на якоре, а остальные связаны с якорем эластичными

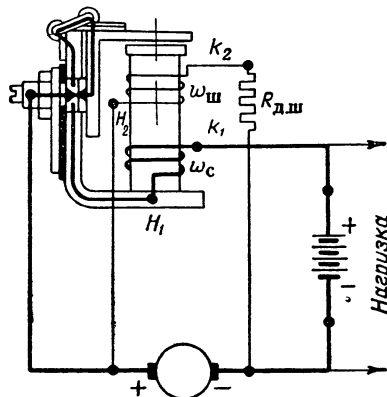
контактными пружинами. Все три подвижных контакта электрически соединены между собой и не изолированы от якоря. Два неподвижных контакта (основной и вспомогательный) ввернуты на резьбе в общую толстую латунную пластину, а третий — в другую пластину, изолированную от первой. Вспомогательные контакты служат для предохранения главных контактов от обгорания при размыкании тока. Это достигается тем, что подвижный контакт, связанный с якорем посредством эластичной пластины, при притяжении последнего к сердечнику входит в соприкосновение с соответствующим неподвижным контактом несколько раньше, чем замыкаются главные контакты; соответственно при размыкании вспомогательные контакты размыкаются несколько позже главных контактов.

Противодействующая регулировочная пружина состоит из двух сложенных вместе полос (одна стальная, другая бронзовая). Один конец пружины закреплен на якоре, а другой упирается в регулировочный винт 13. Завертывая или вывертывая регулировочный винт и изменяя положение гайки 8, уменьшают или увеличивают воздушный зазор между якорем и сердечником, регулируя тем самым напряжение включения.



Фиг. 8.1. Устройство минимального реле.

1—остов, 2, 3 и 4—контакты, 5—пружина якоря, 6—якорь, 7—шпилька, 8—гайка, 9—сердечник, 10 и 11—катушки с обмотками $\omega_{ш}$ и $\omega_{с}$, 12—регулирующая пружина, 13—регулирующий винт.



Фиг. 8.2. Схема соединения минимального реле с генератором и аккумуляторной батареей.

Конец k_1 последовательной обмотки соединен с зажимом, к которому подводится провод от положительного полюса аккумуляторной батареи. Отрицательные полюсы генератора и аккумуляторной батареи имеют непосредственное соединение.

При отсутствии тока в обмотках реле якорь находится в непрянутом состоянии и контакты реле разомкнуты.

Присоединяется генератор к сети тогда, когда его напряжение достигает некоторого заранее установленного значения. Это присоединение осуществляется параллельной обмоткой $w_{\text{ш}}$, включенной на зажимы генератора через дополнительное сопротивление $R_{\text{д.ш}}$, служащее для температурной компенсации.

Обычно минимальное реле настраивается так, что реле срабатывает и замыкает контакты при напряжении, несколько меньше (примерно на 1,5—2 в ниже), чем напряжение, на которое настроен регулятор напряжения. После замыкания контактов генератор, как это видно из схемы на фиг. 8.2, включается на сеть параллельно с аккумуляторной батареей и в дальнейшем, при повышении своего напряжения, должен питать сеть и подзаряжать аккумуляторную батарею.

Для защиты от обратных токов служит последовательная обмотка реле $w_{\text{с}}$, которая включается в цепь якоря генератора. Последовательная обмотка намотана так, что когда генератор отдает ток во внешнюю цепь, то она усиливает действие параллельной обмотки; когда же генератор начинает потреблять ток от аккумуляторной батареи, то последовательная обмотка создает магнитодвижущую силу, направленную навстречу м. д. с. параллельной обмотки, т. е. ослабляет действие последней.

При этом результирующие ампервитки минимального реле $AW_{\text{рез}}$ равны разности $AW_{\text{ш}} - AW_{\text{с}}$, и при снижении э. д. с. генератора происходит их уменьшение главным образом за счет увеличения $AW_{\text{с}}$ последовательной обмотки и лишь незначительно за счет одновременного снижения ампервитков параллельной обмотки до величины $AW'_{\text{ш}}$.

Необходимые ампервитки последовательной обмотки $AW_{\text{с}}$ минимального реле определяются на основании следующих соображений. Для перевода якоря реле из начального в конечное положение требуются ампервитки $AW_{\text{ср}}$, а для того, чтобы якорь снова перешел в начальное состояние, необходимо снизить ампервитки до $AW_{\text{отп}}$, $AW_{\text{отп}} < AW_{\text{ср}}$. Принято отношение этих ампервитков называть коэффициентом возврата, т. е.

$$k_{\text{в}} = \frac{AW_{\text{отп}}}{AW_{\text{ср}}}.$$

Так как $AW_{\text{ср}} = AW_{\text{ш}}$, а при возврате якоря из конечного в начальное положение

$$AW_{\text{отп}} = AW'_{\text{ш}} - AW_{\text{с}} = k_{\text{в}} AW_{\text{ш}}, \text{ причем } AW'_{\text{ш}} < AW_{\text{ш}},$$

то, поскольку с достаточным приближением можно считать, что $AW'_{\text{ш}} \approx AW_{\text{ш}}$, получают

$$AW_{\text{с}} \approx (1 - k_{\text{в}}) AW_{\text{ш}}.$$

Если заранее задан обратный ток $I_{\text{обр}}$, то витки последовательной обмотки

$$w_{\text{с}} = \frac{(1 - k_{\text{в}}) AW_{\text{ср}}}{I_{\text{обр}}}.$$

Реле напряжения и обратного тока, применяемое в специальных регуляторных коробках серии РК, должно (в холодном состоянии) подключать генератор к бортовой сети при напряжении генератора, не меньшем 24,6 в (при окружающей температуре 20° С); обратный ток выключения реле не должен превышать 10 а.

Иногда для автоматической защиты генераторов мощностью не более 1500 вт применяется объединенное реле, представляющее комбинацию минимального реле с реле для защиты генератора от перегрузки.

Описанное выше реле, выполняющее также роль контактора, пригодно лишь для обслуживания генераторов постоянного тока мощностью до 1500—2000 *вт* при напряжениях в 26—30 *в*; кроме того, как известно, сила притяжения электромагнита пропорциональна квадрату намагничивающих ампервитков и, следовательно, не зависит от направления тока. Поэтому реле электромагнитного типа, используемое для включения на параллельную работу, приходит в действие независимо от полярности зажимов, к которым приключена цепь обмотки реле. Это является существенным недостатком таких минимальных реле, так как при применении их возможно присоединение генератора к аккумулятору или другому источнику тока и при неодинаковой полярности. При таком включении генератор соединяется с другим источником тока последовательно, что приводит к короткому замыканию в этой цепи, весьма опасному для всей энергосистемы.

б) Реле минимального напряжения и обратного тока с контактором (реле обратного тока с контактором). При работе с генераторами мощностью более 2 *квт* реле минимального напряжения и обратного тока описанной выше конструкции не могут выполнять функции контактора главной цепи и не в состоянии поэтому обеспечивать надежные включения и отключения генератора. При номинальных токах порядка 100 *а* необходимо иметь более массивные контакты со значительно большим контактным давлением. В результате этого неизбежно должны увеличиться размеры электромагнита выключающего устройства и его обмоток, а также величина обратного тока, необходимая для размыкания контактов. Поэтому автоматы для включения на параллельную работу и защиты от обратного тока для мощных генераторов выполняются состоящими из двух элементов:

- 1) главного контактора, служащего для включения и выключения цепи генератора; электромагнит этого контактора обычно имеет только одну обмотку;

- 2) управляющего реле, собственно реле минимального напряжения и обратного тока, которое своими контактами замыкает и размыкает цепь обмотки электромагнита главного контактора.

Управляющее реле реагирует на изменение режима работы генератора, т. е. включается при достижении генератором заданного напряжения и выключается вследствие ослабления возбуждения электромагнита реле при появлении обратного тока заданной величины.

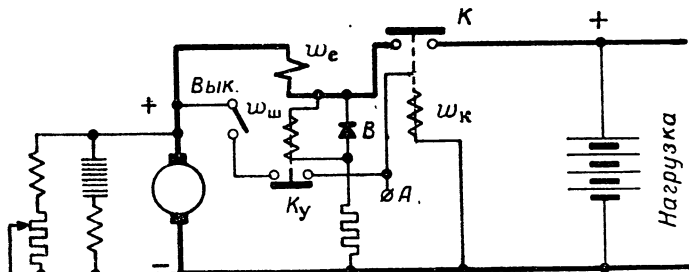
Главный контактор служит только в качестве выключателя цепи генератора. Примером такого автомата может служить реле отечественного производства типа РЛ-14А, предназначенное для автоматического включения на бортовую сеть и отключения от нее самолетных генераторов мощностью до 9000 *вт*. Кроме того, реле защищает генератор от обратных токов и предохраняет бортовую сеть от включения в нее генератора с неправильной полярностью.

Принципиальная схема реле РЛ-14А изображена на фиг. 8.3. Присоединение генератора к общим шинам и отключение от них производится контактором, контакты которого K включены последовательно с токовой обмоткой ω_0 управляющего реле. Контактор замыкает свои контакты, когда обмотка его ω_k подключается на зажимы генератора, что наступает при замыкании контактов управляющего реле K_y .

Контакты управляющего реле замыкаются при воздействии на якорь реле параллельной обмотки $\omega_{ш}$, включенной на зажимы генератора последовательно с сопротивлением температурной компенсации. Это происходит тогда, когда напряжение генератора достигает 26,0—26,5 *в*.

Выпрямитель B , включенный параллельно обмотке $\omega_{\text{ш}}$, предотвращает возможность присоединения к сети генератора с несоответствующей полярностью.

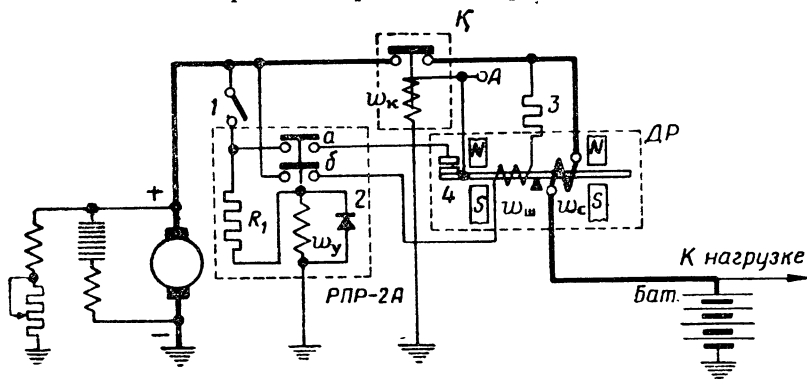
При наличии обратного тока имеет место уменьшение результирующих ампервитков управляющего реле, так как при этом $AW_{\text{рез}} = AW_{\text{ш}} - AW_{\text{с}}$; контакты реле K_y размыкаются, обесточивается обмотка контактора $\omega_{\text{к}}$ и генератор отключается от сети.



Фиг. 8.3. Принципиальная схема соединения реле РЛ-14А.

Зажим A на схеме фиг. 8.3 предназначен для управления включением и отключением генератора, минуя управляющее реле.

в) Дифференциальное реле напряжения и обратного тока с контактором. В последнее время в системах энергоснабжения вместо обычных реле минимального напряжения и обратного тока с контактором для защиты генераторов находят широкое применение дифференциальные реле, примером которых может служить отечественное дифференциальное минимальное реле ДМР-400. Принципиальная схема такого реле изображена на фиг. 8.4.



Фиг. 8.4. Принципиальная схема дифференциального минимального реле ДМР-400.

K —контактор, $ДР$ —дифференциальное реле, $РПР-2А$ —вспомогательное реле, ω_y —обмотка реле $РПР-2А$, $\omega_{\text{ш}}$ —параллельная обмотка дифференциального реле, $\omega_{\text{к}}$ —обмотка контактора, $\omega_{\text{с}}$ —последовательная обмотка дифференциального реле, 1 —выключатель, 2 —выпрямитель, 3 —остеклованное сопротивление, 4 —контакты дифференциального реле, a и b —контакты реле $РПР-2А$, R_1 —добавочное сопротивление.

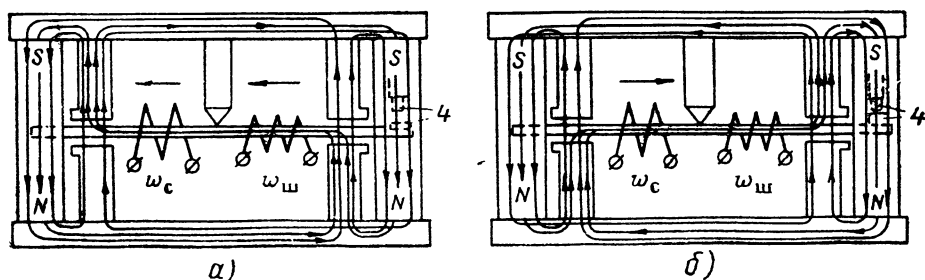
В отличие от реле РЛ-14А дифференциальное минимальное реле включает генератор в сеть не при определенном значении напряжения, а при заданном превышении напряжения генератора над напряжением сети, поэтому оно и называется дифференциальным.

При отсутствии напряжения в сети реле ДМР-400 включает генератор как обычное минимальное реле при напряжении генератора 13,5—20,0 в, но только при нагрузке мощностью не менее 1 вт.

ДМР-400 состоит из следующих основных элементов: дифференциального реле ДР, поляризованного с помощью постоянных магнитов; контактора К с электромагнитным управлением и вспомогательного реле (РПР-2А) с двумя парами контактов. Все элементы автомата смонтированы на общей панели.

Принцип действия реле ДМР-400 заключается в следующем. Если выключатель 1 (фиг. 8.4) замкнут, то при возрастании напряжения генератора до 13,5—20,0 в срабатывает вспомогательное реле (РПР-2А), при замыкании контактов б которого параллельная $\omega_{\text{ш}}$ и последовательная $\omega_{\text{с}}$ обмотки реле включаются на разность напряжений генератора и сети.

Дифференциальное реле реагирует не только на величину напряжения, подведенного к его обмоткам, но и на направление тока в них.



Фиг. 8.5. Схема распределения магнитных потоков дифференциального реле.

а—при разомкнутых контактах, б—при замкнутых контактах.

Пока напряжение сети выше, чем напряжение генератора, ток в параллельной и последовательной обмотках реле ДР протекает от сети к генератору. Создаваемая им м. д. с. действует по направлению потока в якоре реле от постоянных магнитов (фиг. 8.5,а), удерживающего якорек в положении, при котором контакты 4 реле разомкнуты.

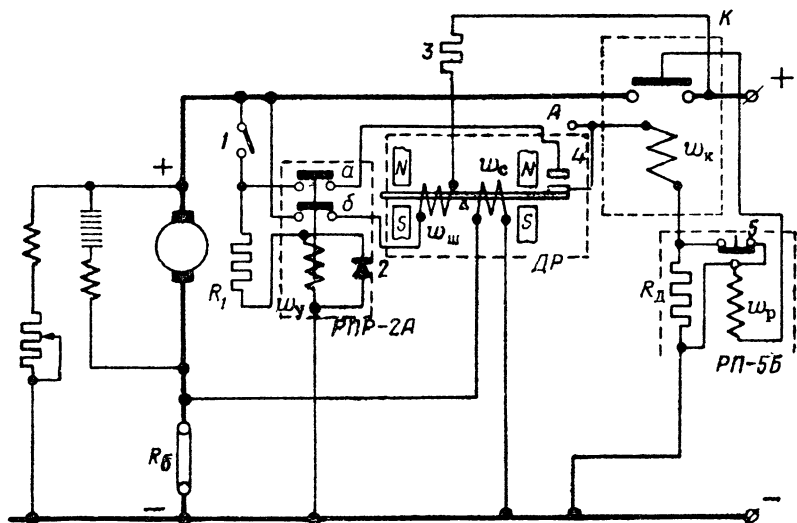
Когда напряжение генератора превысит напряжение сети на 0,3—0,7 в, ток в обмотках реле, изменивший свое направление, создает м. д. с., действующую противоположно действию постоянных магнитов. Якорек реле перемещается в другое крайнее положение, когда контакты 4 реле замыкаются. Обмотка контактора $\omega_{\text{ж}}$ оказывается под напряжением. Контактор К срабатывает и подключает генератор к сети. При этом контакты контактора шунтируют параллельную обмотку $\omega_{\text{ш}}$ дифференциального реле, однако якорек остается в прежнем положении, так как м. д. с., создаваемая током, в последовательной обмотке совпадает с направлением потока постоянных магнитов (фиг. 8.5,б) и помогает им удерживать якорек в положении, когда контакты 4 замкнуты. Следует заметить, что когда генератор имеет регулятор напряжения, поддерживающий напряжение, равное или меньшее, чем напряжение сети, включение генератора может произойти лишь в том случае, если уравнивающие обмотки регулятора несколько снизят напряжение уже подключенных генераторов и повысят напряжение подключаемого так, что его напряжение превысит напряжение сети на 0,3—0,7 в. Это означает, что для включения генератора на параллельную работу необходимо, чтобы цепь уравнивающих обмоток была замкнута.

Если по какой-либо причине напряжение включенного в сеть генератора начнет снижаться, то из сети в генератор потечет обратный ток, создающий м. д. с., действующую в направлении, противоположном потоку от постоянных магнитов. При обратном токе 15—35 а произойдет

перебрасывание якорька и размыкание контактов дифференциального реле. Обмотка контактора обесточится и контактор отключит генератор от сети.

Во избежание подключения генератора с неправильной полярностью вспомогательное реле поляризуется при помощи селеновых выпрямителей 2 (фиг. 8.4), включенных параллельно обмотке ω_y реле.

Реле ДМР-400 может применяться для работы с любым типом самолетного генератора постоянного тока с номинальным напряжением 28,5 в и номинальным током не более 400 а.



Фиг. 8. 6. Принципиальная схема дифференциального минимального реле ДМР-600.

К—контактор, ДР—дифференциальное реле, РПР-2А—вспомогательное реле, РП-5Б—реле включения дополнительного сопротивления R_d , ω_y —обмотка РПР-2А, $\omega_{ш}$ —параллельная обмотка дифференциального реле, ω_k —обмотка контактора, ω_c —последовательная обмотка дифференциального реле, ω_p —обмотка реле РП-5Б, R_6 —балластное сопротивление.

1—выключатель, 2—выпрямитель, 3—остеклованное сопротивление, 4—контакты дифференциального реле, а и б—контакты реле РПР-2А, 5—контакты реле РП-5Б, R_1 —дополнительное сопротивление.

Использование дифференциальных реле напряжения и обратного тока позволяет избежать вибрационного режима реле обратного тока, который может возникнуть при параллельной работе генераторов без нагрузки при применении обычного реле обратного тока.

Для защиты генераторов мощностью 18 кВт применяется реле ДМР-600, схема включения которого изображена на фиг. 8.6. Отличие ДМР-600 от ДМР-400 состоит в том, что последовательная обмотка дифференциального реле ДМР-600 включена параллельно к балластному сопротивлению R_6 , включенному в минусовую цепь, а не последовательно в плюсовую цепь генератора, как это выполнено в схеме ДМР-400. Такое включение позволяет несколько уменьшить габариты реле, ибо при этом исключается необходимость размещать на реле обмотку (хотя бы и из одного-двух витков), рассчитанную на номинальный ток 600 а.

Уменьшение нагрева обмотки контактора достигается тем, что в цепь обмотки контактора после его срабатывания вводится дополнительное сопротивление R_d при размыкании контактов 5 реле РП-5Б, ток в обмотке ω_p которого подается с подвижного контакта контактора с помощью гибкого проводника.

Величина обратного тока, при котором отключается реле, $I_{обр} = 25-50$ а. Следует отметить, что реле ДМР-600 по сравнению с реле ДМР-400 имеет тот недостаток, что при коротком замыкании на участке фидера генератора от положительного полюса до ДМР-600 через балластное сопротивление протекает ток короткого замыкания в том же направлении, что и ток нагрузки. Вследствие этого ДМР-600 не отключает от сети фидера, замкнутого на корпус.

§ 8.2. ЗАЩИТА ГЕНЕРАТОРОВ ОТ ПЕРЕГРУЗОК

Внешние характеристики самолетных генераторов, работающих с регуляторами напряжения (фиг. 8.7), показывают, что при некоторых внешних нагрузках ток может достигать значений, превосходящих номинальное.

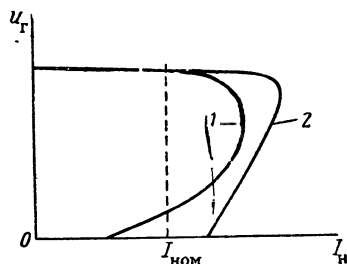
Продолжительность работы генератора при перегрузке, т. е. при токе, превышающем номинальное значение, зависит от величины тока и тепловых свойств генератора. Зависимость между допустимыми значениями величины и времени перегрузки для заданного генератора называется тепловой характеристикой последнего (фиг. 8.8) или его перегрузочной способностью. Согласно существующим нормам современные мощные самолетные генераторы способны выдерживать перегрузку током $1,5 I_{ном}$ в течение $2 \div 1$ минут через каждые 2 часа работы под номинальной нагрузкой.

Более длительная перегрузка или перегрузка, возникающая через промежутки времени, недостаточные для охлаждения, может привести к перегреву генератора; ухудшению коммутации и выходу его из строя.

Во избежание чрезмерных перегревов и ухудшения коммутации генераторов при длительных перегрузках во многих случаях самолетные генераторные установки, в которых используются генераторы мощностью до 2000 вт, снабжаются специальными приборами, посредством которых ограничивается ток в цепи якоря генератора и его величина поддерживается на предельно допустимом постоянном уровне. К числу таких приборов относятся так называемые максимальные реле, которые по устройству и принципу действия представляют не что иное, как регуляторы тока. Подобные приборы применяются не только тогда, когда генератор работает изолированно на сеть, но и в случае совместной его работы с другими генераторами или аккумуляторной батареей.

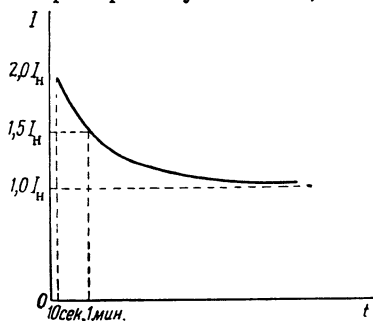
В энергетических системах с генераторами мощностью более 2 квт защита от перегрузок не применяется, так как аккумуляторная батарея обычно относительно небольшой емкости не в состоянии снять перегрузку с нескольких генераторов большой мощности.

Для защиты генераторов мощностью менее 2 квт в качестве регуляторов тока могут быть использованы как регуляторы вибрационного типа, так и угольные регуляторы.



Фиг. 8.7. Внешние характеристики самолетных генераторов постоянного тока, работающих с регулятором напряжения.

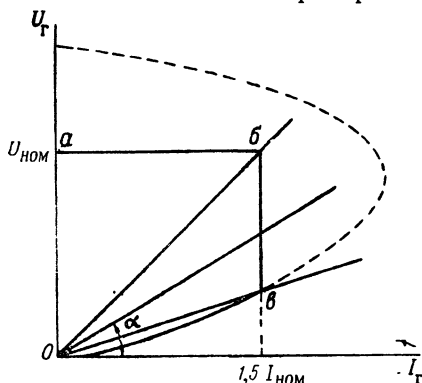
1—генератор параллельного возбуждения, 2—генератор параллельного возбуждения с обмоткой дополнительных полюсов.



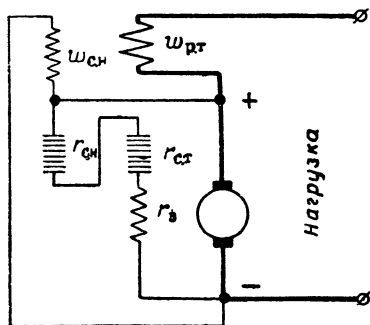
Фиг. 8.8. Тепловая характеристика генератора.

а) Защита генератора посредством вибрационных и угольных регуляторов тока (максимальных реле). При работе генератора с регулятором напряжения и регулятором тока внешняя характеристика генератора имеет типичный вид, изображенный на фиг. 8.9. Регулятор тока по устройству отличается от регулятора напряжения аналогичного типа лишь тем, что обмотка электромагнита его включается последовательно во внешнюю цепь генератора и сила магнитного притяжения создается ампервитками, пропорциональными току якоря.

Как известно, сила притяжения якоря электромагнита определяется результирующими намагничивающими ампервитками, поэтому при постоянстве механической противодействующей силы регулятор поддерживает постоянным ток генератора.



Фиг. 8.9. Внешняя характеристика генератора, снабженного регулятором напряжения и регулятора тока.



Фиг. 8.10. Схема включения угольного регулятора тока.

В случае регулятора тока реостатного типа, каким является, например, ограничитель тока, работающий совместно с угольным регулятором напряжения (фиг. 8.10), управляемые сопротивления $r_{сг}$ и $r_{сн}$ обоих аппаратов включаются последовательно в цепь возбуждения. До тех пор пока нагрузка генератора не превысит допустимой величины, изменение сопротивления цепи возбуждения для поддержания постоянства напряжения $U_{ном}$ осуществляются за счет работы регулятора напряжения (участок $a-b$ на фиг. 8.9).

Когда же нагрузка генератора становится выше установленного предела, регулятор напряжения свою работу прекращает, а вместо него вступает в действие регулятор тока, причем этот регулятор вводит в цепь возбуждения такое сопротивление, при котором ток в якоре генератора поддерживается на заданном предельном уровне (участок $бв$ на фиг. 8.9); напряжение на зажимах генератора при этом получается пропорциональным сопротивлению внешней цепи $R \equiv \tan \alpha$.

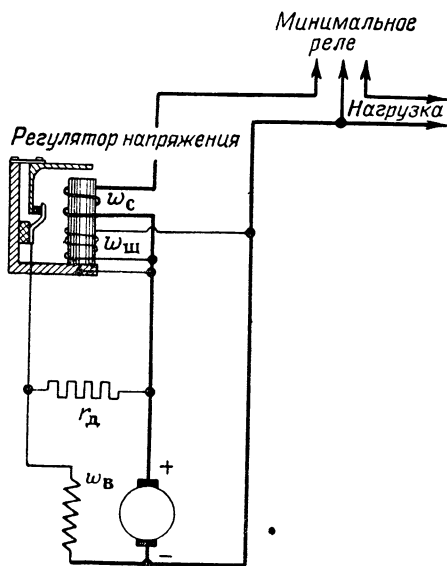
При применении регулятора напряжения и регулятора тока вибрационного типа контакты $K_{р,т}$ и $K_{р,н}$ обоих аппаратов соединяются последовательно (фиг. 8.11) и шунтируют одно и то же добавочное сопротивление в цепи возбуждения генератора, в результате чего достигается процесс, аналогичный только что описанному.

При токах, меньших допустимого значения, контакты регулятора тока остаются замкнутыми, а контакты регулятора напряжения вибрируют и поддерживают напряжение постоянным.

Когда ток нагрузки генератора возрастает до значения, на которое настроен регулятор тока, последний начинает работать, т. е. контакты его

характеристика регулятора тока. Из этих характеристик следует, что регулятор тока не защищает генератор в зоне *Б*, и, с другой стороны, не позволяет использовать перегрузочные способности генератора в зоне *А*. Очевидно, что улучшение охлаждения увеличивает зону неиспользованных перегрузочных способностей генератора и уменьшает незащищаемую зону. Ухудшение охлаждения уменьшает зону неиспользованных способностей генератора, но значительно увеличивает незащищаемую зону.

Регулятор тока не учитывает времени действия перегрузки и ограничивает нагрузку генератора независимо от теплового состояния последнего; между тем в условиях хорошего охлаждения, особенно на пер-



Фиг. 8.13. Схема защиты генератора при помощи токовой обмотки на регуляторе напряжения.

вых этапах полета самолета (взлет, набор высоты и т. д.) или когда генератор еще недостаточно нагрет, он мог бы при отсутствии регулятора тока взять на себя значительно большую нагрузку и был бы в состоянии обеспечить энергией основные мощные кратковременные потребители, как, например, электромеханизмы: электроприводы шасси, взлетно-посадочных щитков, стабилизатора и т. д. Регулятор же тока автоматически перекладывает на бортовую аккумуляторную батарею все перегрузки, что приводит к усиленному разряду аккумуляторной батареи.

Таким образом, регулятор тока вибрационного или угольного типа не позволяет полностью использовать перегрузочные способности самолетного генератора, особенно при хороших условиях охлаждения.

б) Защита генератора от перегрузок с помощью регулятора напряжения,

снабженного токовой обмоткой. В ряде систем электроснабжения для защиты генератора от перегрузок используется регулятор напряжения, на сердечнике которого, кроме основной параллельной обмотки — обмотки напряжения $\omega_{ш}$, помещается последовательная обмотка $\omega_{с}$, включенная, как показано на фиг. 8.13, во внешнюю цепь генератора. Таким образом, в этом регуляторе электромагнит имеет смешанное возбуждение.

Последовательная обмотка регулятора предназначена для того, чтобы автоматически уменьшать напряжение генератора при увеличении тока нагрузки.

Внешняя характеристика генератора при работе с регулятором напряжения со смешанным возбуждением электромагнита имеет падающий характер (фиг. 8.14), и если генератор работает параллельно с аккумуляторной батареей, то по мере увеличения общей нагрузки аккумуляторная батарея воспринимает на себя все больший ток, частично разгружая тем самым генератор.

Обмотки регулятора напряжения включаются так, что при протекании электрического тока от генератора ампервитки обеих обмоток действуют согласно, т. е.

$$AW_{\text{рез}} = AW_{\sigma} + AW_{\text{ш}}, \quad (8.1)$$

где $AW_{\text{рез}}$ — результирующие ампервитки регулятора;

AW_c — ампервитки последовательной обмотки;

$AW_{\text{ш}}$ — ампервитки параллельной обмотки (обмотки напряжения).

Так как

$$AW_c = I_r w_c, \quad (8.2)$$

а

$$AW_{\text{ш}} = \frac{U_r}{R_{\text{ш}}} w_{\text{ш}}, \quad (8.3)$$

где U_r — напряжение генератора;

I_r — ток генератора;

w_c и $w_{\text{ш}}$ — числа витков соответствующих обмоток генератора;

$R_{\text{ш}}$ — сопротивление цепи обмотки напряжения регулятора,

то, подставляя выражения (8.2) и (8.3) в (8.1), получают

$$AW_{\text{рез}} = I_r w_c + \frac{U_r}{R_{\text{ш}}} w_{\text{ш}}. \quad (8.4)$$

Для холостого хода генератора $I_r = 0$, а $U_r = U_{r0}$, и, следовательно,

$$AW_{\text{рез}} = \frac{U_{r0}}{R_{\text{ш}}} w_{\text{ш}} = \text{const}. \quad (8.5)$$

Для вполне определенной настройки регулятора результирующие ампервитки являются величиной постоянной. Это означает, что

$$\frac{U_{r0}}{R_{\text{ш}}} w_{\text{ш}} = I_r w_c + \frac{U_r}{R_{\text{ш}}} w_{\text{ш}}, \quad (8.6)$$

а

$$U_r = U_{r0} - I_r R_{\text{ш}} \frac{w_c}{w_{\text{ш}}}. \quad (8.7)$$

Для данного типа регулятора $R_{\text{ш}} \frac{w_c}{w_{\text{ш}}}$ является величиной постоянной. Обозначая

$$R_{\text{ш}} \frac{w_c}{w_{\text{ш}}} = R'_p, \quad (8.8)$$

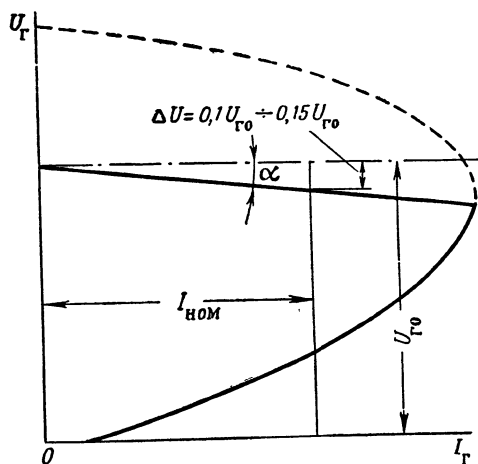
получают из выражения (8.7)

$$U_r = U_{r0} - I_r R'_p. \quad (8.9)$$

Из уравнения (8.5) следует, что напряжение на зажимах генератора представляет линейную функцию тока, а внешняя характеристика может быть изображена прямой линией (см. фиг. 8.14). Тангенс угла наклона этой прямой $\text{tg } \alpha = R'_p$.

Изменением R'_p , что можно выполнить, изменяя, например, число витков последовательной обмотки w_c , можно регулировать наклон кривой внешней характеристики или так называемую жесткость характеристики.

У существующих конструкций регуляторов напряжения с двумя обмотками величины $w_{\text{ш}}$, w_c и $R_{\text{ш}}$ выбираются так, чтобы снижение напряжения при изменении нагрузки от холостого хода $I_r = 0$ до номинальной $I_r = I_{\text{ном}}$ не превышало 10—15%.



Фиг. 8.14. Внешняя характеристика генератора, работающего с регулятором, снабженным токовой обмоткой и обмоткой напряжения.

При более значительном снижении напряжения может оказаться, что включенная параллельно генератору аккумуляторная батарея начнет разряжаться раньше, чем ток генератора достигнет номинального значения.

Описанная система защиты позволяет несколько лучше использовать перегрузочную способность генератора и вместе с тем защищает генератор от чрезмерно опасных перегрузок.

в) **Тепловая защита генератора.** Как было уже указано, применение токоограничивающего устройства в виде регулятора тока по существу не разрешает вопроса защиты генератора от перегрева, так как регуляторы тока ограничивают лишь величину тока, но не продолжительность работы генератора при этом токе.

Наиболее правильным следует считать использование самолетных генераторов вплоть до их максимальной мощности при одновременной защите их от недопустимых перегревов и повреждений.

Факторами, ограничивающими величину перегрузки генераторов, являются коммутация и превышение температуры. Следует отметить, что кратковременная перегрузка самолетных генераторов по току, величина которого может доходить до $I_{кр}$, вызывает значительное ухудшение коммутации, повышение степени искрения до 2—3 шкалы ГОСТ. Однако при весьма кратковременной работе в этих условиях сильное искрение и связанное с ним обгорание коллекторных пластин практически не может быть непосредственной причиной, выводящей генератор из строя. Гораздо более опасным является косвенное влияние ухудшенной коммутации, имеющее следствием повышенный перегрев коллектора, который может привести к выплавлению проводников обмотки из петушков.

При перегрузке генератора превышение температуры коллектора резко увеличивается как за счет ухудшенной коммутации, так и за счет увеличения коммутируемого тока. Поэтому для защиты генератора от недопустимых перегрузок наиболее целесообразна так называемая тепловая защита, сущность которой заключается в уменьшении перегрузки генератора лишь тогда, когда превышение температуры его достигает предельно допустимого значения для безаварийной работы.

Подобного рода защита, реагирующая на температуру генератора, должна при перегревах не отключать генератор от бортовой сети, а лишь снижать ток в зависимости от условий охлаждения генератора до такой величины, при которой температура нагрева остается на допустимом пределе.

В соответствии с этими требованиями проводилось много исследований и были предложены различные системы защиты с применением встроенных в генератор теплочувствительных элементов.

Тепловое реле встраивают в наиболее уязвимом с точки зрения нагрева месте генератора так, чтобы оно строго следило за нагревом этого участка. При перегреве генератора тепловое реле срабатывает и сигнализирует об этом экипажу. В этом случае в зависимости от условий полета выключаются так называемые второстепенные потребители, что не препятствует в данный момент продолжению полета.

§ 8.3. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ НА ЗАЖИМАХ САМОЛЕТНОГО ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

При эксплуатации самолетных генераторов постоянного тока, особенно в боевой обстановке, бывают случаи короткого замыкания. При мощности современных самолетных генераторов постоянного тока в 18—24 кВт и более величины возможных токов короткого замыкания на жимах генераторов могут достигать многих тысяч ампер. Такие боль-

шие токи представляют большую опасность не только для самих генераторов, но и для всей электрической системы самолета, а также для самолета.

При внезапном коротком замыкании на зажимах самолетного генератора постоянного тока, т. е. при резком и быстром уменьшении внешнего сопротивления, э. д. с. машины вследствие инерции магнитного потока остается в первый момент времени почти неизменной, и процесс перехода от начального стационарного состояния к другому сопровождается поэтому чрезмерным увеличением тока.

На фиг. 8.15 изображена электрическая схема самолетного генератора постоянного тока, на зажимах которого произошло короткое замыкание.

Для облегчения рассмотрения всех сложных явлений процесса короткого замыкания сделаны следующие допущения:

1. Скорость вращения генератора при коротком замыкании остается неизменной. Такое допущение можно сделать, так как мощность авиационного двигателя, приводящего во вращение генератор, неизмеримо больше мощности генератора.

2. Влияние вихревых токов пренебрежимо мало.

3. Кривая намагничивания аппроксимирована прямой.

Это допущение не вносит существенных погрешностей, если наклон этой прямой выбрать с учетом режима работы генератора, предшествовавшего короткому замыканию.

4. Реакция якоря не принимается во внимание.

5. Установившееся значение сопротивления в месте короткого замыкания равно нулю, т. е. короткое замыкание является металлическим.

Принятые допущения хотя могут несколько исказить изображение действительного характера переходных процессов в генераторе при коротком замыкании, но они позволяют описать все явления посредством линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами.

Для цепи якоря генератора можно написать следующее уравнение для нестационарного процесса:

$$L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + r_{\text{я}} i_{\text{я}} + U = E = cn \Phi_{\text{я}}$$

или

$$(T_{\text{я}} D + 1) r_{\text{я}} i_{\text{я}} + U = cn \Phi_{\text{я}}, \quad (8.10)$$

где $i_{\text{я}}$ — ток цепи якоря;

$L_{\text{я}}$ — индуктивность всей цепи якоря, состоящая из индуктивностей обмотки якоря и обмотки дополнительных полюсов;

$r_{\text{я}}$ — сопротивление цепи якоря между зажимами генератора;

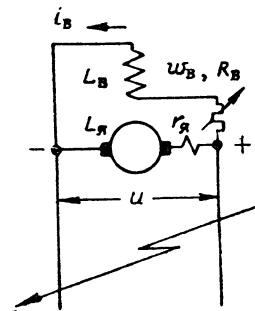
$T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{r_{\text{я}}}$ — постоянная времени цепи якоря генератора;

U — напряжение на зажимах генератора;

E — э. д. с. якоря;

$c = \frac{p}{a} \frac{N}{60} 10^{-8}$ — множитель пропорциональности;

p — число пар полюсов;



Фиг. 8.15. Короткое замыкание на зажимах самолетного генератора постоянного тока.

a — число пар параллельных ветвей;
 N — число проводов якоря;
 n — скорость вращения генератора;
 $\Phi_{\text{я}}$ — магнитный поток якоря;
 $D = \frac{d}{dt}$ — оператор дифференцирования.

Уравнение для цепи возбуждения шунтового генератора имеет вид

$$L_{\text{в}} \frac{di_{\text{в}}}{dt} + i_{\text{в}} R_{\text{в}} = U \text{ или } (T_{\text{в}} D + 1) i_{\text{в}} = \frac{U}{R_{\text{в}}}, \quad (8.11)$$

где $i_{\text{в}}$ — ток в цепи возбуждения;
 $L_{\text{в}}$ — индуктивность цепи возбуждения;
 $R_{\text{в}}$ — сопротивление всей цепи возбуждения;
 $T_{\text{в}} = \frac{L_{\text{в}}}{R_{\text{в}}}$ — постоянная времени цепи возбуждения.

Если магнитная система генератора слабо насыщена, то характеристику намагничивания генератора можно аппроксимировать так:

$$\Phi_{\text{в}} = \Phi_0 + b' i_{\text{в}} = b' (i_0 + i_{\text{в}}), \quad (8.12)$$

где b' — коэффициент пропорциональности;
 i_0 — ток возбуждения, соответствующий остаточному магнетизму;
 Φ_0 — поток остаточного намагничивания, принимаемый за постоянную величину.
 В свою очередь

$$\Phi_{\text{в}} = \sigma \Phi_{\text{я}}$$

и тогда

$$\Phi_{\text{я}} = \frac{b'}{\sigma} (i_0 + i_{\text{в}}) = b (i_0 + i_{\text{в}}),$$

где σ — коэффициент рассеяния;
 $b = \frac{b'}{\sigma}$.

Учитывая последние соотношения, можно уравнение (8.10) написать так:

$$(T_{\text{я}} D + 1) r_{\text{я}} i_{\text{я}} + u = cn \left[\frac{b' i_{\text{в}}}{\sigma} + \frac{\Phi_0}{\sigma} \right] = E_0 + c n b i_{\text{в}} = c n b (i_0 + i_{\text{в}}). \quad (8.13)$$

При внезапном металлическом коротком замыкании напряжение на зажимах генератора падает до нуля хотя и быстро, но не скачком. Практически можно считать, что это падение происходит по экспоненциальному закону

$$U = U_1 e^{-\frac{t}{T_{\text{к}}}},$$

где $T_{\text{к}}$ — постоянная времени, характеризующая скорость спада напряжения;
 U_1 — напряжение на зажимах генератора перед моментом короткого замыкания.

При таком изменении напряжения на зажимах генератора переходные процессы описываются так [см. формулы (8.11), (8.13)]: для цепи якоря

$$(T_{\text{я}} D + 1) r_{\text{я}} i_{\text{я}} = E_0 + c n b i_{\text{в}} - U_1 e^{-\frac{t}{T_{\text{к}}}}, \quad (8.14)$$

для цепи возбуждения

$$(T_B D + 1) R_B i_B = U_1 e^{-\frac{t}{T_K}}. \quad (8.15)$$

Решение последнего уравнения приводит к следующему результату:

$$i_B = \frac{U_1}{R_B} \left[\frac{T_B}{T_B - T_K} e^{-\frac{t}{T_B}} - \frac{T_K}{T_B - T_K} e^{-\frac{t}{T_K}} \right]. \quad (8.16)$$

Подставляя это выражение для i_B в уравнение (8.14), получают

$$(T_{\text{я}} D + 1) r_{\text{я}} i_{\text{я}} = E_0 + c b n \frac{U_1}{R_B} \left[\frac{T_B}{T_B - T_K} e^{-\frac{t}{T_B}} - \frac{T_K}{T_B - T_K} e^{-\frac{t}{T_K}} \right] - U_1 e^{-\frac{t}{T_K}}. \quad (8.17)$$

Решение этого уравнения дает

$$i_{\text{я}} = \frac{E_0}{r_{\text{я}}} + \frac{c b n}{R_B} \frac{T_B^2}{(T_B - T_K)(T_B - T_{\text{я}})} \frac{U_1}{r_1} e^{-\frac{t}{T_B}} - \frac{c b n T_K^2 + R_B T_K (T_B - T_K)}{R_B (T_B - T_K)(T_K - T_{\text{я}})} \frac{U_1}{r_1} e^{-\frac{t}{T_K}} + B e^{-\frac{t}{T_{\text{я}}}}.$$

Для определения постоянной интегриации B необходимо принять во внимание, что в начальный момент короткого замыкания, т. е. при $t=0$,

$$i_{\text{я}}(0) = i_{1\text{я}}; \quad U(0) = U_1;$$

на основании этих начальных условий

$$B = i_{1\text{я}} - \frac{E_0}{r_{\text{я}}} - \frac{c b n}{R_B} \left[\frac{T_B^2}{(T_B - T_K)(T_B - T_{\text{я}})} - \frac{T_K^2}{(T_B - T_K)(T_K - T_{\text{я}})} \right] \frac{U_1}{r_1} + \frac{U_1}{r_1} \frac{T_K}{T_K - T_{\text{я}}}.$$

Таким образом,

$$i_{\text{я}} = i_{1\text{я}} e^{-\frac{t}{T_{\text{я}}}} + \frac{E_0}{r_{\text{я}}} \left[1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{я}}}} \right] + \frac{c b n}{R_B} \frac{T_B^2}{(T_B - T_K)(T_B - T_{\text{я}})} \frac{U_1}{r_1} \left[e^{-\frac{t}{T_B}} - e^{-\frac{t}{T_{\text{я}}}} \right] + \frac{c b n T_K^2 + R_B T_K (T_B - T_K)}{R_B (T_B - T_K)(T_K - T_{\text{я}})} \frac{U_1}{r_1} \left[e^{-\frac{t}{T_{\text{я}}}} - e^{-\frac{t}{T_K}} \right]. \quad (8.18)$$

Если внезапное короткое замыкание сопровождается скачкообразным (мгновенным) падением напряжения на зажимах генератора до нуля, что соответствует $T_K=0$, то выражение для переходного тока якоря приобретает вид

$$i_{\text{я}} = i_{1\text{я}} e^{-\frac{t}{T_{\text{я}}}} + \frac{E_0}{r_{\text{я}}} \left[1 - e^{-\frac{t}{T_{\text{я}}}} \right] + \frac{c b n}{R_B} \frac{T_B}{T_B - T_{\text{я}}} \frac{U_1}{r_1} \left[e^{-\frac{t}{T_B}} - e^{-\frac{t}{T_{\text{я}}}} \right]. \quad (8.19)$$

Сопоставляя друг с другом уравнения (8.18) и (8.19), легко увидеть, что у них в правой части первые два члена одинаковые, в третьем члене постоянный множитель больше в уравнении (8.18), чем в (8.19), кроме того, в уравнении (8.18) правая часть имеет еще дополнительный член, который при $T_K > T_{\text{я}}$ имеет отрицательное значение. Анализ показывает, что замедление процесса спада напряжения U при коротком замыкании на зажимах приводит также и к замедлению нарастания тока

короткого замыкания. Если же процесс замыкания характеризуется $\frac{T_k}{T_{\text{я}}} \rightarrow 0$, то в этом случае этот ток достигает максимума, значение которого (если принять, что $T_{\text{в}} \gg T$), приблизительно равно

$$i_{\text{я max}} = i_{\text{1я}} e^{-\frac{t_m}{T_{\text{я}}}} + \frac{E_0}{r_{\text{я}}} \left[1 - e^{-\frac{t_m}{T_{\text{я}}}} \right] + \frac{c b n}{R_{\text{в}}} \frac{U_1}{r_1} e^{-\frac{t_m}{T_{\text{в}}}}. \quad (8.20)$$

Здесь t_m — время, когда ток в цепи якоря достигает максимума. Это время t_m приблизительно равно

$$t_m = \frac{T_{\text{в}} T_{\text{я}}}{T_{\text{в}} - T_{\text{я}}} \ln \frac{T_{\text{в}}}{T_{\text{я}}}. \quad (8.21)$$

Из последней формулы видно, что увеличение отношения постоянных времени $\frac{T_{\text{в}}}{T_{\text{я}}}$ вызывает увеличение t_m и, следовательно, максимума $i_{\text{я}}$. Так, например, при $\frac{T_{\text{в}}}{T_{\text{я}}} = 10$ величина $\frac{t_m}{T_{\text{я}}}$ получается равной около 5, а $\frac{t_m}{T_{\text{в}}} = 0,5$; при этом значении $e^{-\frac{t_m}{T_{\text{в}}}} = 0,61$. Если взять $\frac{T_{\text{в}}}{T_{\text{я}}} = 20$, то $e^{-\frac{t_m}{T_{\text{в}}}} = 0,76$. Так как при $\frac{T_{\text{в}}}{T_{\text{я}}} \gg 10$ величина $e^{-\frac{t_m}{T_{\text{я}}}}$ почти равна нулю, то уравнение для пика тока приобретает более простой вид:

$$i_{\text{я max}} \approx \frac{E_0}{r_{\text{я}}} + \frac{c b n}{R_{\text{в}}} \frac{U_1}{r_1} e^{-\frac{t_m}{T_{\text{в}}}}. \quad (8.22)$$

Подставляя в последнее выражение приведенное выше значение t_m (8.21), получают

$$i_{\text{я max}} = \frac{E_0}{r_{\text{я}}} + \frac{c b n}{r_{\text{я}}} \frac{U_1}{R_{\text{в}}} \left(\frac{T_{\text{я}}}{T_{\text{в}} - T_{\text{я}}} \right)^{\frac{T_{\text{я}}}{T_{\text{в}} - T_{\text{я}}}} = \frac{E_0}{r_{\text{я}}} + \frac{E_{\text{нач}} - E_0}{r_{\text{я}}} x^{\frac{x}{1-x}}, \quad (8.23)$$

где $E_{\text{нач}} = c b n (i_{\text{в}} + i_0)$ — э. д. с. генератора при $t=0$;

$i_{\text{в}} = \frac{U_1}{R_{\text{в}}}$ — ток возбуждения при $t=0$;

$E_0 = c b n i_0$ — э. д. с. остаточного намагничивания;

$x = \frac{T_{\text{я}}}{T_{\text{в}}}.$

Из (8.23) видно, что максимальное значение тока короткого замыкания зависит от величины э. д. с. перед коротким замыканием — $E_{\text{нач}}$ и соотношения между постоянными времени цепей возбуждения и якоря — x . Если короткое замыкание происходит при одном и том же напряжении на зажимах генератора, то величина начальной э. д. с. тем больше, чем больше нагрузка генератора перед коротким замыканием. Следовательно, величина максимума тока короткого замыкания тем больше, чем больше предварительная нагрузка генератора.

Для современных генераторов $x = \frac{T_{\text{я}}}{T_{\text{в}}}$ меняется в пределах от 0,01 до 0,1 и даже более в зависимости от скорости вращения. При высокой скорости вращения (и сохранении номинального напряжения на зажимах генератора) величина x получается большой вследствие введения в цепь возбуждения дополнительного сопротивления.

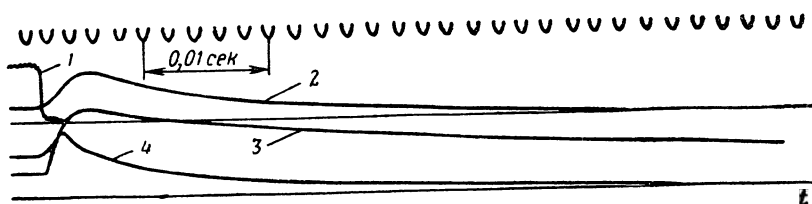
На фиг. 8.16 приведена зависимость $\frac{x}{1-x}$ от x , из которой следует, что увеличение x (увеличение скорости вращения генератора) приводит

к уменьшению $\frac{x}{1-x}$ и, следовательно, к уменьшению максимума тока короткого замыкания (8.23), если $E_{\text{нач}} \approx U_0 = \text{const.}$

Обычно при расчетах короткого замыкания исходят из таких случаев, при которых ток короткого замыкания достигает наибольшего значения.

Выше был рассмотрен процесс короткого замыкания на зажимах генератора при отсутствии регулятора напряжения. Если генератор снабжен автоматическим регулятором напряжения, то вследствие даже небольшого снижения напряжения на зажимах генератора регулятор выводит добавочное сопротивление в цепи возбуждения; тогда R_v делается минимальным. Это вызывает увеличение T_v , что приводит к несколько позднему по времени наступлению максимума тока и более замедленному дальнейшему уменьшению тока. Что касается значения максимума тока, то оно мало зависит от того, произошло ли короткое замыкание при действии регулятора или без него.

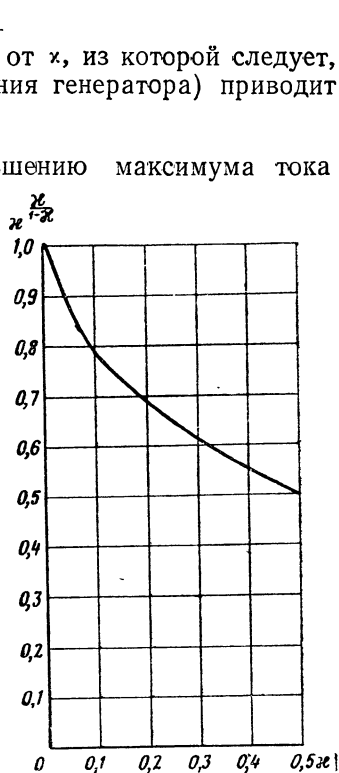
На фиг. 8.17. изображена осциллограмма процессов при коротком замыкании на зажимах самолетного генератора постоянного тока мощностью 18 кВт, работающего с регулятором напряжения. Сравнивая эту осциллограмму с соответствующей осциллограммой, снятой при отсутствии регулятора напряжения (фиг. 8.18), нетрудно установить, что максимальное значение тока короткого замыкания практически осталось тем же самым, однако в последующие за максимумом моменты времени ток короткого замыкания при наличии регулятора напряжения спадает медленнее, чем в процессе короткого замыкания при отсутствии регулятора напряжения.



Фиг. 8.17. Осциллограмма процесса короткого замыкания на зажимах самолетного генератора постоянного тока мощностью 18 кВт, работающего с угольным регулятором напряжения.

1—напряжение на зажимах генератора, 2—ток возбуждения, 3—ток якоря, 4—напряжение на угольном столбике.

Поэтому при расчетах максимальной величины тока короткого замыкания можно не учитывать действие регулятора напряжения и использовать приближенную формулу (8.23).



Фиг. 8.16. Зависимость

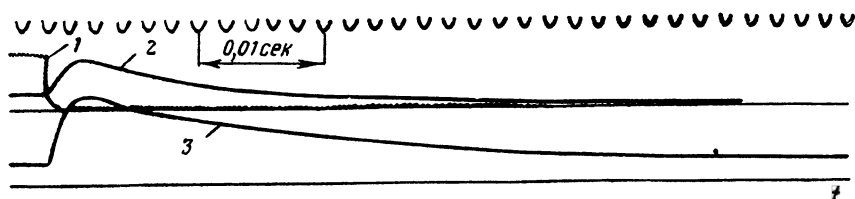
$\frac{x}{1-x}$ от x .

Найденное приближенное выражение для величины тока короткого замыкания самолетного генератора постоянного тока (8.23) справедливо только для того случая, когда короткое замыкание происходит на зажимах генератора. Если короткое замыкание происходит на некотором удалении от зажимов генератора, то при определении тока короткого замыкания необходимо иметь в виду, что на зажимах генератора напряжение получается равным $i_{\text{я}} R$, где R — сопротивление участка внешней цепи до места короткого замыкания.

В этом случае процессы в цепи якоря и цепи возбуждения генератора описываются следующими уравнениями:

$$L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + (r_{\text{я}} + R) i_{\text{я}} = E_0 + cnbi_{\text{в}}; \quad (8.24)$$

$$T_{\text{в}} \frac{di_{\text{в}}}{dt} + i_{\text{в}} = \frac{i_{\text{я}} R}{R_{\text{в}}}. \quad (8.25)$$



Фиг. 8.18. Осциллограмма процесса короткого замыкания на зажимах самолетного генератора постоянного тока мощностью 18 кВт при отсутствии регулятора напряжения (обозначения те же, что на фиг. 8.17).

Отсюда получается

$$(T_{\text{в}} D + 1) (T'_{\text{я}} D + 1) (r_{\text{я}} + R) i_{\text{я}} = E_0 + cnbi_{\text{я}} \frac{R}{R_{\text{в}}}, \quad (8.26)$$

$$\text{где } T'_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{r_{\text{я}} + R} < T_{\text{я}}; \quad T_{\text{я}} = \frac{L_{\text{я}}}{r_{\text{я}}}$$

или

$$\left\{ [T_{\text{в}} T'_{\text{я}} D^2 + (T_{\text{в}} + T'_{\text{я}}) D] (r_{\text{я}} + R) + \left(r_{\text{я}} + R - cnb \frac{R}{R_{\text{в}}} \right) \right\} i_{\text{я}} = E_0. \quad (8.27)$$

Последнее уравнение может быть представлено так:

$$\left\{ [T_{\text{в}} T'_{\text{я}} D^2 + (T_{\text{в}} + T'_{\text{я}}) D + 1] (r_{\text{я}} + R) - cnb \frac{R}{R_{\text{в}}} \right\} i_{\text{я}} = E_0. \quad (8.28)$$

Отсюда следует

$$i_{\text{я}} = A e^{-\frac{t}{T_1}} + B e^{-\frac{t}{T_2}} + \frac{E_0}{r_{\text{я}} + R - cnb \frac{R}{R_{\text{в}}}}. \quad (8.29)$$

Здесь A, B — постоянные интегрирования, определяемые по начальным данным, а величины $\frac{1}{T_1}, \frac{1}{T_2}$ — корни характеристического уравнения (8.28).

В этом случае максимум наступает гораздо скорее, пик тока приобретает приблизительное значение (при среднем значении скорости вращения генератора), равное

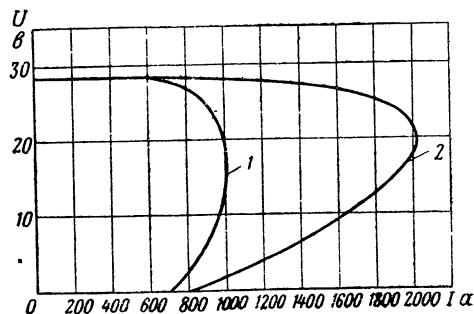
$$i_{\text{я max}} \approx \frac{E_0}{r_{\text{я}}} + 0,9 \frac{U_1}{r_{\text{я}} + R} \quad (8.30)$$

так как $\frac{cnb}{R_{\text{в}}} \approx 1$).

Если самолетный генератор имеет независимое возбуждение, то процесс изменения тока в цепи якоря описывается дифференциальным уравнением первого порядка, при этом максимальное значение тока короткого замыкания получается при $t=\infty$, т. е. при установившемся режиме, и достигает теоретически значения $i_{\text{я}} = \frac{E}{r_{\text{я}}}$, если пренебречь реакцией якоря и пр.

Что касается установившихся токов короткого замыкания, то их расчет производится по экспериментально снятым внешним характеристикам генераторов. У современных самолетных генераторов постоянного тока величина установившихся токов металлического короткого замыкания в ряде случаев превосходит номинальное значение тока (см. фиг. 8.19). Объясняется это компаундирующим (подмагничивающим) действием токов в коммутируемых секциях.

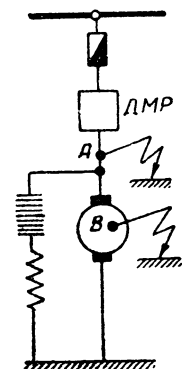
На фиг. 8.19 приведены внешние характеристики самолетного генератора постоянного тока мощностью 18 кВт, работающего с угольным регулятором напряжения при скорости вращения $n=4000$ об/мин (кривая 1) и $n=9000$ об/мин (кривая 2). Из этих кривых видно, что установившиеся токи короткого замыкания могут значительно превосходить номинальное значение.



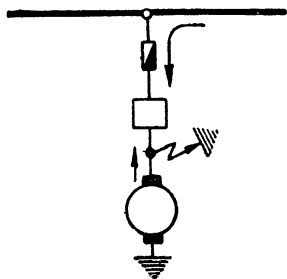
Фиг. 8.19. Внешние характеристики самолетного генератора постоянного тока мощностью 18 кВт, работающего с регулятором напряжения.

§ 8.4. ЗАЩИТА ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА ОТ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Под защитой генераторов от коротких замыканий подразумевается защита собственно самого генератора от установившихся токов, протекающих по цепи якоря при коротком замыкании на генераторном фидере (в точке А на фиг. 8.20) или внутри обмотки якоря (в точке В на фиг. 8.20). При возникновении короткого замыкания в точке А или в точке В генератор отключается от сети с помощью реле обратного тока, благодаря чему обеспечивается нормальная работа остальной энергосистемы. Генератор же при отсутствии специальной защиты продолжает работать в режиме короткого замыкания.



Фиг. 8.20. Короткое замыкание на фидере самолетного генератора.



Фиг. 8.21. Защита энергосистемы от короткого замыкания на генераторном фидере с помощью плавкого предохранителя.

короткого замыкания, а для отсоединения генераторного фидера, на котором произошло короткое замыкание от сборных шин. Принципиальная электрическая схема системы для этого случая представлена на фиг. 8.21. Как видно из схемы, к месту короткого замыкания направляются токи как

от генератора, на котором произошло короткое замыкание, так и от неповрежденной системы. При малом удалении места короткого замыкания от зажимов генератора установившийся ток короткого замыкания генератора мощностью до 1,5—3 кВт с параллельным возбуждением обычно невелик и большой опасности для генератора не представляет.

Величина тока короткого замыкания, протекающего из системы, определяется мощностью источников системы. Для маломощных систем этот ток невелик, и реле обратного тока, реагируя на обратный ток, размыкает цепь короткого замыкания системы. Но на больших самолетах применяются мощные электрические системы с токами короткого замыкания, достигающими до нескольких тысяч ампер. Реле обратного тока даже современных конструкций не могут обеспечить надежного размыкания таких значительных токов, и в большинстве случаев при коротком замыкании на генераторном фидере контакты реле свариваются. Такие аварии очень опасны, так как приводят не только к выходу из строя всех источников электрической энергии, но и к пожару на самолете.

Установка в цепи генератора плавкого предохранителя, рассчитанного на ток, значительно превышающий величину максимального тока генератора, позволяет сохранить нормальную работу всей остальной электрической системы, так как при коротком замыкании на генераторном фидере предохранитель сгорает и тем самым изолирует место короткого замыкания от системы.

Так как установившийся ток короткого замыкания генераторов небольшой мощности, выполняемых без дополнительных полюсов, невелик, то их целесообразно снабжать какой-либо защитой от коротких замыканий.

В самолетных генераторах большой мощности, имеющих дополнительные полюса, величина установившегося тока короткого замыкания может значительно превосходить номинальное значение тока. Возникновение короткого замыкания на зажимах генератора или в цепи якоря приводит к перегреву генератора и выходу его из строя. Для этих генераторов установка защиты от коротких замыканий является вполне целесообразной.

Система защиты генератора от коротких замыканий должна удовлетворять следующим требованиям:

1. Возникновение короткого замыкания на зажимах одного из генераторов не должно приводить ни к выходу из строя энергоузла самолета, ни к повреждению самого генератора.

2. Повреждение схемы защиты не должно приводить к ложному отключению генератора от энергоузла самолета.

3. Защита от короткого замыкания, помимо отключения генератора от сети, должна воздействовать и на цепь возбуждения генератора, с тем чтобы в возможно меньший промежуток времени погасить его поле возбуждения.

В том случае, когда разрыв цепи обмотки возбуждения не является эффективным средством гашения поля генератора, следует прибегать к закорачиванию обмотки дополнительных полюсов или иным более эффективным средствам гашения поля генератора.

В настоящее время самолетные генераторы постоянного тока специальной защитой от токов короткого замыкания пока не оборудуются.

Примером одной из возможных схем защиты генератора от короткого замыкания может служить продольная дифференциальная защита, описанная в гл. XIX.

Глава IX

ГЕНЕРИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА САМОЛЕТЕ

§ 9.1. ОСОБЕННОСТИ САМОЛЕТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Самолетные генераторы переменного тока с частотой тока в 400 *гц* являются сравнительно быстроходными машинами: при восьмиполюсной конструкции скорость вращения составляет 6000 об/мин, при шестиполюсной — 8000 об/мин, при четырехполюсной — 12 000 об/мин, при двухполюсной — 24 000 об/мин. В общем случае скорость вращения генераторов с переменнo-полюсной магнитной системой связана с частотой f и числом пар полюсов p соотношением $n = \frac{60f}{p}$ об/мин.

Скорость вращения самолетных синхронных машин ограничивается сроком службы шарикоподшипников и допустимыми механическими напряжениями от центробежных сил, возникающих при вращении ротора. По этим причинам скорость вращения у большинства генераторов переменного тока не превосходит 8000—12 000 об/мин. Лишь при специальном исполнении машины и применении специальных смазок возможно построение генераторов со скоростью вращения в 24 000 об/мин.

Авиационные генераторы, как правило, рассчитаны на интенсивное принудительное охлаждение с использованием динамического напора встречного воздуха. В генераторах, предназначенных для высотных самолетов и самолетов со сверхзвуковой скоростью полета, приходится применять жидкостное паровое охлаждение или охлаждение посредством турбоохладительных установок.

Благодаря быстроходности, интенсивному охлаждению и применению высококачественных и теплостойких материалов, вес на единицу мощности и размеры самолетного генератора переменного тока получаются значительно меньшими, чем вес на единицу мощности и размеры нормального генератора промышленного типа одинаковой мощности.

Так, например, для самолетных генераторов мощностью от 15 до 60 *квa* при $n=6000$ об/мин вес на единицу мощности составляет примерно 1,4—0,7 *кг/квa*, в то время как для промышленных генераторов аналогичной мощности, например, серии СГ при $n=1000$ об/мин вес на единицу мощности составляет примерно 19—10 *кг/квa*.

В соответствии с тактико-техническими требованиями генераторы переменного тока самолетного типа должны допускать полуторакратную перегрузку при номинальном напряжении в течение 5 мин. и двухкратную перегрузку по току при напряжении $0,9U_{\text{ном}}$ в течение 5 сек.

Генераторы должны обеспечивать нормальную работу на высоте до 20 000 *м* при изменении окружающей температуры от —60 до +50° С при относительной влажности 98 %.

К синхронным генераторам, предназначенным для установки на скоростных самолетах, предъявляются особые требования в отношении допустимого нагрева.

В соответствии с потребностью в электроэнергии на средних и больших самолетах применяются трехфазные генераторы переменного тока мощностью от 7,5 до 60 и даже до 200 *кв*а при напряжении 208/120 *в*, частоте 400 *гц* и $\cos \varphi = 0,75$.

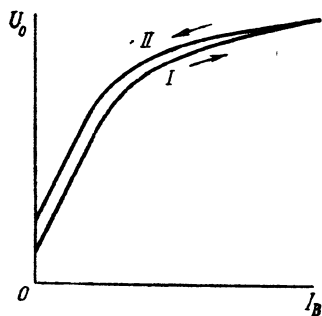
На некоторых самолетах применяются двухполюсные машины турбогенераторного типа, синхронная скорость которых составляет 24 000 об/мин.

Синхронные машины этого типа еще легче и предназначаются для сцепления с турбинами, вращающимися обычно с большими скоростями.

Применение высокоскоростного генератора позволяет в данном случае устранить редуктор и тем самым уменьшить общий вес генераторной установки.

§ 9.2. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА САМОЛЕТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

а) Характеристика холостого хода представляет зависимость наводимого в обмотке якоря фазового напряжения U_0 от тока возбуждения I_b или от намагничивающих ампервитков AW_b при постоянной скорости вращения якоря или магнитной системы n и при отсутствии тока в фазовых обмотках. На фиг. 9.1 представлен типичный вид кривой



Фиг. 9.1. Характеристика холостого хода синхронного генератора.

характеристики холостого хода генератора переменного тока. Наклон начального прямолинейного участка характеристики зависит от воздушного зазора: чем меньше воздушный зазор, тем круче поднимается прямолинейная часть характеристики. С увеличением возбуждения вследствие насыщения железа, увеличения потока рассеяния и реакции от вихревых токов повышение э. д. с. происходит в меньшей степени; поэтому кривая характеристики холостого хода за своей прямолинейной частью имеет загиб в виде колена, а затем снова переходит в почти прямую линию с гораздо меньшим наклоном по отношению к оси абсцисс.

Кривая характеристики холостого хода обычно начинается не с нуля, а с некоторого конечного значения, зависящего от скорости вращения и остаточного магнетизма.

Вследствие влияния гистерезиса кривая характеристики холостого хода имеет петлеобразный вид.

На основании характеристики холостого хода можно определить коэффициент магнитного насыщения машины, ампервитки междужелезного пространства, сопротивление воздушного зазора и ампервитки железа. Определение этих величин производится точно так же, как и в машинах постоянного тока (см. гл. III).

Самолетные генераторы переменного тока, сконструированные для работы при постоянной частоте 400 *гц*, имеют величину μ_0 более 0,4, а в генераторах, работающих при переменной частоте, μ_0 менее 0,4.

По данным о фазовых или линейных напряжениях холостого хода можно проверить симметричность многофазной системы. Трехфазная система практически считается симметричной, если величина напряжения

обратной последовательности составляет не более 5% от значения напряжения прямой последовательности или когда отношение суммы квадратов разностей между значениями каждого напряжения линейного (фазового) и средним значением тех же напряжений к квадрату среднего значения последних получается не более 0,004; для трехфазной системы это условие выражается так:

$$\frac{\Delta U_A^2 + \Delta U_B^2 + \Delta U_C^2}{U_{\text{ср}}^2} < 0,004, \quad (9.1)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta U_A &= U_A - U_{\text{ср}}, \\ \Delta U_B &= U_B - U_{\text{ср}}, \\ \Delta U_C &= U_C - U_{\text{ср}}, \\ U_{\text{ср}} &= \frac{U_A + U_B + U_C}{3}. \end{aligned}$$

На фиг. 9.2 приведена усредненная кривая характеристики холостого хода трехфазных генераторов переменного тока типа 30СГС.

б) Характеристика короткого замыкания дает представление о том, как изменяются установившиеся токи короткого замыкания I_k при различных видах короткого замыкания обмоток якоря в зависимости от тока возбуждения I_b при постоянной скорости вращения n или постоянной частоте f :

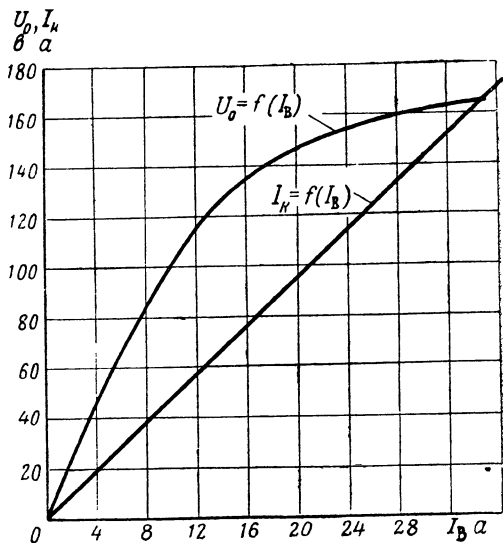
$$I_k = f(I_b) \text{ при } U=0; n=\text{const.}$$

Обычно в генераторах нормального типа ток короткого замыкания достигает значения, равного номинальному току, при относительно малом результирующем потоке якоря, поэтому при слабо насыщенной магнитной цепи машины кривые характеристики короткого замыкания представляют собой вначале прямые, а затем по мере увеличения насыщения слегка загибающиеся к оси абсцисс линии.

При асимметричном коротком замыкании синхронных машин создается инверсное магнитное поле, которое, пересекая витки обмотки возбуждения, наводит в последней напряжение, вызывающее появление в цепи возбуждения переменных токов двойной частоты I_i . Эти токи совместно с постоянным током возбуждения I_b образуют пульсирующий ток, эффективное значение которого равняется

$$I_{b. \text{эфф}} = \sqrt{I_b^2 + I_i^2}. \quad (9.2)$$

Типичные характеристики одно-, двух- и трехфазных коротких замыканий изображены на фиг. 9.3.



Фиг. 9.2. Характеристика холостого хода и трехфазного короткого замыкания синхронного генератора типа 30СГС.

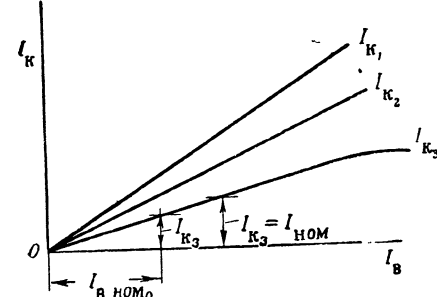
Характеристики коротких замыканий совместно с характеристикой холостого хода дают возможность определить основные электрические параметры синхронной машины, как то: ОКЗ, синхронный реактанс по продольной оси x_d , синхронный реактанс по поперечной оси x_q , реактанс обратной последовательности x_2 , реактанс нулевой последовательности x_0 .

ОКЗ, как известно, представляет отношение установившегося тока трехфазного короткого замыкания I_K при возбуждении $I_{в, ном0}$, соответствующем номинальному напряжению холостого хода, к номинальному току генератора $I_{ном}$, т. е.

$$\text{ОКЗ} = \frac{I_K}{I_{ном}}. \quad (9.3)$$

Эта величина характеризует собой реакцию якоря и реактивное сопротивление рассеяния. Чем больше размагничивающее действие поля токов якоря на основное магнитное поле, тем меньше установившийся ток короткого замыкания при одном и том же возбуждении.

В отношении тока короткого замыкания к современным самолетным синхронным машинам предъявляются определенные требования, а именно, чтобы установившийся ток короткого замыкания не превосходил определенных границ. В синхронных машинах самолетного типа с явно выраженными полюсами ОКЗ=0,6—0,75. Для повышения устойчивости параллельной работы желательно ОКЗ увеличивать.



Фиг. 9.3. Характеристики короткого замыкания синхронного генератора.

Реактансы x_d , x_q , x_2 и x_0 определяются на основании следующих известных соотношений (9.4) ÷ (9.6), если пренебречь влиянием активного сопротивления обмотки якоря:

$$I_{к.з} = \frac{U'_0}{x_d}, \quad (9.4)$$

$$I_{к2} = \frac{\sqrt{3} U'_0}{x_d + x_2}, \quad (9.5)$$

$$I_{к1} = \frac{3U'_0}{x_d + x_2 + x_0}. \quad (9.6)$$

Если сопоставить значения токов трех-, двух- и однофазного коротких замыканий при одном и том же токе возбуждения, то они в синхронных машинах с явно выраженными полюсами находятся в следующих отношениях:

$$I_{к3} : I_{к2} : I_{к1} = 1 : (1,3 \div 1,5) : (2,2 \div 2,4). \quad (9.7)$$

Пользуясь этими соотношениями для $U'_{01} = U'_{02} = U'_{03} = U'_0$, можно легко найти:

синхронный реактанс

$$x_d = \frac{U'_0}{I_{к.з}}; \quad (9.8)$$

реактанс обратной последовательности

$$x_2 = \frac{\sqrt{3} U'_0}{I_{к2}} - x_d = U'_0 \left[\frac{\sqrt{3}}{I_{к2}} - \frac{1}{I_{к.з}} \right]; \quad (9.9)$$

реактанц нулевой последовательности

$$x_0 = \frac{3U'_0}{I_{K1}} - \frac{\sqrt{3}U'_0}{I_{K2}} = \sqrt{3}U'_0 \left[\frac{\sqrt{3}}{I_{K1}} - \frac{1}{I_{K2}} \right]. \quad (9.10)$$

В этих формулах I_{K3} , I_{K2} , I_{K1} — токи трех-, двух- и однофазного коротких замыканий при одном и том же токе возбуждения I_B ;

U'_0 — напряжение холостого хода при ненасыщенном магнитном состоянии машины и при токе возбуждения I_B (см. фиг. 9.4).

Что касается синхронного реактанца по продольной оси x_d , то в машинах с неявно выраженными полюсами

$$x_q = x_d; \quad (9.11)$$

в машинах с явно выраженными полюсами $x_q < x_d$, и он приблизительно равен

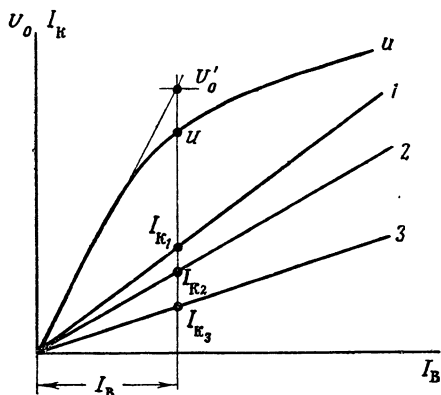
$$x_q \approx 0,65x_d. \quad (9.12)$$

Синхронные реактанцы по продольной и поперечной осям x_d и x_q состоят из двух компонент:

$$x_d = x_{da} + x_s \quad (9.13)$$

и

$$x_q = x_{qa} + x_s, \quad (9.14)$$



Фиг. 9.4. Характеристики холостого хода и коротких замыканий.

из которых одна обусловлена реакцией якоря, а другая — магнитным потоком рассеяния, создаваемым токами обмотки якоря.

Обычно значения реактивных сопротивлений x_d , x_q , x_2 , x_0 , x_s выражаются в относительных единицах. Ориентировочные данные о значениях этих сопротивлений для самолетных трехфазных генераторов с явно выраженными полюсами приведены в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Значения реактивных сопротивлений трехфазных синхронных генераторов

x_d	x_q	$x_p = 1,3x_s^*$	x_2	x_0
1,4—1,65	0,85—1,2	0,10—0,15	0,15—0,25	0,06—0,10

* $x_p = 1,3 x_s$ — реактанц Потье.

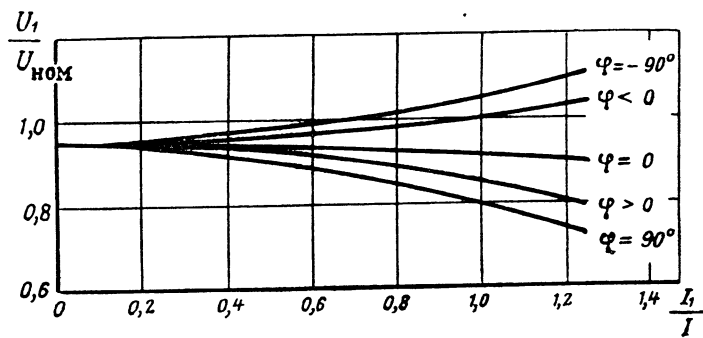
в) Внешняя характеристика представляет связь между фазовым напряжением U_1 и фазовым током I_1 при постоянной скорости вращения n , постоянной величине тока возбуждения и постоянном $\cos \varphi$.

При изменении нагрузки генератора переменного тока напряжение на его зажимах меняется, несмотря на то что скорость вращения и возбуждение генератора постоянны. Эти изменения напряжения генератора вызваны активным и реактивным падениями напряжения в обмотке генератора при прохождении тока по обмотке якоря и влиянием реакции якоря.

Как известно, при активной нагрузке генератора поток реакции якоря действует по поперечной оси машины, при чисто индуктивной нагрузке поток реакции якоря направлен по продольной оси (оси потока полюсов) и размагничивает машину, и при чисто емкостной нагрузке поток реакции якоря также идет по продольной оси, но намагничивает машину.

На фиг. 9.5 изображены кривые внешних характеристик генератора для различных видов нагрузки. Как видно из представленных кривых, напряжение на зажимах генератора с увеличением тока во внешней цепи не остается постоянным: оно уменьшается при активных и индуктивных нагрузках и может возрасти при емкостной нагрузке.

Внешние характеристики позволяют определить так называемое процентное изменение напряжения для определенных условий нагрузки.



Фиг. 9.5. Внешние характеристики синхронного генератора для различных видов нагрузки.

Обычно рассматривается изменение при переходе от номинальной нагрузки к холостому ходу:

$$\Delta u_1 = \frac{U' - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100\%, \quad (9.15)$$

где $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение, которое устанавливается при номинальной нагрузке генератора, а U' — напряжение на зажимах машины при том же токе возбуждения, но после снятия всей нагрузки.

Выражением (9.15) определяется так называемое процентное повышение напряжения.

Аналогично определяется процентное падение напряжения, т. е.

$$\Delta u_2 = \frac{U_{\text{ном}} - U''}{U_{\text{ном}}} 100\%, \quad (9.16)$$

где $U_{\text{ном}}$ — напряжение генератора при холостом ходе, равное по величине номинальному напряжению, а U'' — напряжение при том же токе возбуждения, но при номинальном токе нагрузки. В самолетных трехфазных генераторах $\Delta u_1 \leq 50\%$, а $\Delta u_2 \leq 40\%$.

г) Регулировочная характеристика. Регулировочная характеристика представляет собой зависимость тока возбуждения от тока нагрузки машины при постоянной величине напряжения на зажимах:

$$I_b = f(I) \quad \text{при} \quad U = \text{const}, \quad \cos \varphi = \text{const}, \quad n = \text{const}.$$

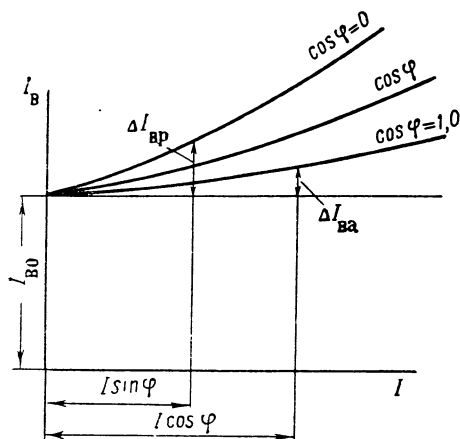
В синхронных генераторах с изменением нагрузки напряжение на зажимах не остается постоянным; поэтому для поддержания напряжения на зажимах машины постоянным необходимо регулировать ток в цепи возбуждения. В современных синхронных машинах для поддержания

постоянства напряжения при изменении нагрузок машины от нуля до максимума требуется регулирование тока возбуждения в широких пределах.

На фиг. 9.6 представлены регулировочные кривые для различных видов нагрузки генераторов. Как видно из этих кривых, чтобы поддержать напряжение на зажимах машины постоянным при возрастании чисто активной или индуктивной нагрузки, необходимо ток возбуждения увеличивать, при увеличении же емкостной нагрузки, наоборот, возбуждение приходится уменьшать.

Для индуктивных нагрузок синхронных генераторов кратность регулирования тока возбуждения K_{i_v} больше единицы и в некоторых случаях достигает 2,0—2,5. При емкостной нагрузке величина K_{i_v} меньше единицы.

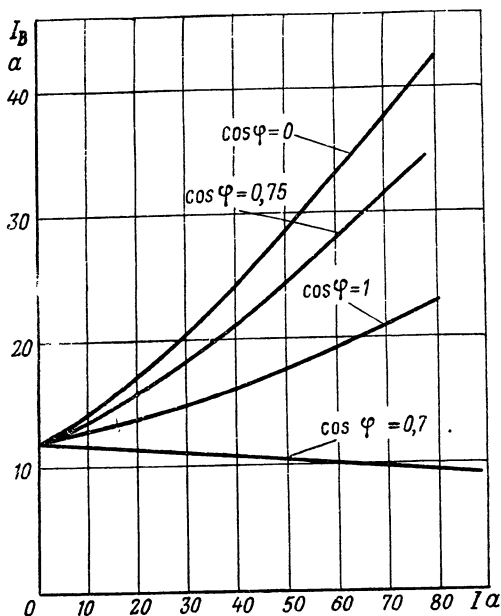
На основании регулировочных характеристик, снятых для нагрузок при $\cos \varphi = 1,0$ и $\cos \varphi = 0$, можно найти токи возбуждения, необходимые для поддержания постоянства напряжения для различных нагрузок при любом заданном $\cos \varphi$.



Фиг. 9.7. Регулировочные характеристики для нагрузок при $\cos \varphi = 1,0$ и $\cos \varphi = 0$.

Значения $\Delta I_{v.a}$ и $\Delta I_{v.p}$ легко найти по кривым регулировочной характеристики, для чего по оси абсцисс откладываются значения $I \cos \varphi$ и $I \sin \varphi$; тогда отрезки соответствующих ординат, заключенные между регулировочными кривыми для $\cos \varphi = 1,0$ и $\cos \varphi = 0$ и горизонтальной прямой, проведенной на высоте I_{v0} , дают значения $\Delta I_{v.a}$ и $\Delta I_{v.p}$ (фиг. 9.7).

Если регулирование (сохранение постоянства) напряжения синхронного генератора производится путем изменения тока в цепи возбуждения возбудителя, то в этом случае желательно иметь регулировочную харак-



Фиг. 9.6. Регулировочные характеристики синхронного генератора типа 30СГС.

Так как магнитное насыщение в генераторах изменяется сравнительно мало при увеличении нагрузки от нуля до максимума, то ток возбуждения можно разбить на три составляющие, а именно: на ток холостого хода I_{v0} и на токи $\Delta I_{v.a}$ и $\Delta I_{v.p}$, компенсирующие соответственно изменения напряжения от действия активной составляющей $I \cos \varphi$ и реактивной составляющей $I \sin \varphi$ тока нагрузки, т. е.

$$I_v = I_{v0} + \Delta I_{v.a} + \Delta I_{v.p}. \quad (9.17)$$

Значения $\Delta I_{v.a}$ и $\Delta I_{v.p}$ легко найти по кривым регулировочной характеристики, для чего по оси абсцисс откладываются значения $I \cos \varphi$ и $I \sin \varphi$; тогда отрезки соответ-

теристику, выражающую зависимость тока возбуждения возбудителя от тока нагрузки генератора переменного тока, при условии что $U = \text{const}$ и $\cos \varphi = \text{const}$.

Регулировочные характеристики дают возможность определить необходимую кратность регулирования тока возбуждения генератора или его возбудителя.

§ 9.3. ВОЗБУЖДЕНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

а) Генераторы переменного тока с самовозбуждением. Для того чтобы осуществить самовозбуждение генератора, необходимо, чтобы машина обладала остаточным намагничением.

Для возбуждения генератора требуется постоянный ток. Поэтому для самовозбуждения генератора появляется необходимость в выпрямлении переменного тока, вырабатываемого генератором, в постоянный.

В качестве выпрямителей используются селеновые выпрямители на алюминиевой основе, допускающие значительную плотность тока и имеющие большую электрическую плотность, чем купроксные выпрямители.

В настоящее время селеновые выпрямители заменяются германиевыми и кремниевыми, обладающими значительно меньшим весом на единицу мощности и имеющими лучшие характеристики.

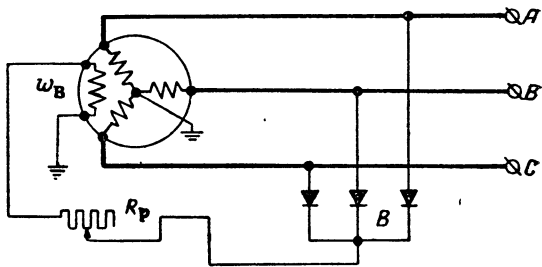
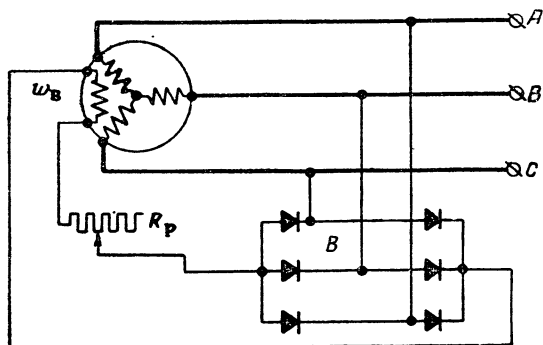
Фиг. 9.8. Схема самовозбуждения синхронного генератора через трехфазный двухполупериодный выпрямитель (схема проф. А. Н. Ларионова).

В СССР самовозбуждающиеся синхронные генераторы с твердыми выпрямителями были предложены и разработаны С. Б. Юдицким в 1940—1941 гг.

Простейшие схемы самовозбуждения синхронных машин приведены на фиг. 9.8 и 9.9. Напряжение от зажимов синхронной машины подводится непосредственно к выпрямителю B . От выпрямителя выпрямленное напряжение подается на обмотку возбуждения.

Ток возбуждения регулируется посредством регулятора поля R_p .

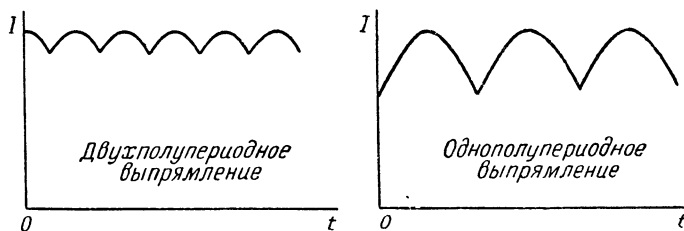
Схема выпрямления, изображенная на фиг. 9.8 и предложенная проф. А. Н. Ларионовым в 1923 г. (иногда в литературе эта схема называется схемой Греца), позволяет преобразовывать переменный трехфазный ток в постоянный, используя в цепи потребления постоянного тока обе половины периода каждой фазы. Схема эта может быть использована при соединении обмотки якоря генератора как в звезду, так и в треугольник.



Фиг. 9.9. Схема самовозбуждения синхронного генератора через трехфазный однополупериодный выпрямитель.

Очевидно, что схема, изображенная на фиг. 9.9, применима только при соединении обмоток якоря генератора в звезду. Число выпрямителей в этой схеме сокращено в два раза, однако пульсации выпрямленного тока больше, чем в схеме А. Н. Ларионова.

На фиг. 9.10 изображена зависимость тока в обмотке возбуждения от времени для этих случаев.

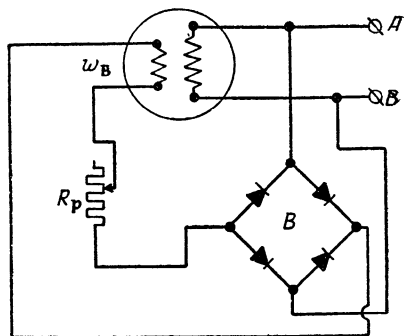


Фиг. 9.10. Кривые изменения тока в обмотке возбуждения генераторов, работающих по схемам 9.8 и 9.9.

Для выпрямления тока при самовозбуждении однофазных генераторов используется обычно схема (фиг. 9.11), которая дает возможность выпрямлять обе полуволны переменного тока.

Приведенные выше схемы наиболее целесообразно применять при напряжении генератора 120—230 в. При больших значениях напряжения можно применять схемы возбуждения синхронных генераторов, в которых обмотка возбуждения присоединяется через выпрямитель B к специальным выводам обмотки статора с линейным напряжением, значительно более низким, чем напряжение генератора, или к специальной дополнительной обмотке статора.

Для понижения напряжения, подводимого к выпрямителю, может быть применен и понизительный трансформатор.



Фиг. 9.11. Схема самовозбуждения однофазного синхронного генератора.

Для того чтобы машина самовозбудилась, необходимо, чтобы она обладала остаточным намагничиванием, и ток возбуждения должен способствовать усилению остаточного магнитного поля. Кроме того, сопротивление цепи возбуждения должно быть меньше некоторого критического сопротивления, зависящего от скорости вращения.

Процесс самовозбуждения синхронной машины протекает так же, как у машины постоянного тока.

При вращении машины возникает напряжение от остаточного магнетизма. Под действием этого напряжения в цепи возбуждения начинает протекать ток, вызывающий увеличение потока возбуждения и, следовательно, э. д. с. генератора. Самовозбуждение продолжается до тех пор, пока э. д. с. генератора не делается равной омическому падению напряжения в цепи возбуждения. В рассматриваемых случаях омическое сопротивление цепи возбуждения (см. фиг. 9.8, 9.9, 9.11) состоит из сопротивлений обмотки возбуждения R_B , сопротивления регулятора поля R_p и сопротивления твердых выпрямителей $R_{вп}$. Зависимость тока возбуждения I_B от приложенного к выпрямителям цепи возбуждения переменного линейного напряжения U_L может быть выражена уравнениями:

при соединении выпрямителей по трехфазной схеме с нулевым выводом (фиг. 9.9)

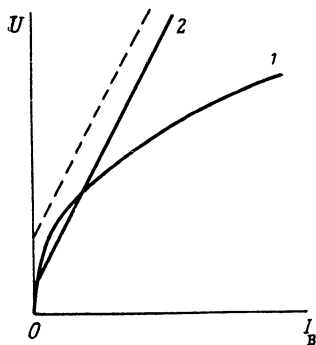
$$I_B = \frac{1,17U_L}{\sqrt{3}(R_B + R_P + R_{вп})};$$

при соединении по схеме А. Н. Ларионова (фиг. 9.8)

$$I_B = \frac{1,35U_L}{(R_B + R_P + R_{вп})}.$$

В течение процесса возбуждения сопротивления обмотки возбуждения и регулятора поля остаются постоянными; сопротивление же выпрямителей $R_{вп}$ изменяется в зависимости от величины тока, протекающего по цепи возбуждения.

Из кривых на фиг. 9.12 видно, что начальный участок кривой расположен выше характеристики холостого хода генератора, и, следовательно, самовозбуждение в этом случае невозможно, так как для получения тока возбуждения необходимо приложить напряжение большее, чем то, которое генератор может создать при этом же токе возбуждения. Таким образом, напряжение, создаваемое за счет остаточного магнитного потока, должно быть не меньше определенной величины, т. е. таким, чтобы характеристика холостого хода генератора имела вид, изображенный на фиг. 9.12 пунктиром.



Фиг. 9.12.

1—кривая зависимости тока возбуждения от величины приложенного к выпрямителю линейного напряжения, 2—характеристика холостого хода генератора.

из магнитной стали: хромистой, кобальтовой или железоникельалюминевой.

В случае генераторов с самовозбуждением приходится считаться с влиянием изменения параметров выпрямителей от температуры окружающей среды, а также с потерей возбуждения при трехфазном коротком замыкании. Во избежание этого и с целью поддержания устойчивости прибегают к компаундированию возбуждения.

В самолетных генераторах переменного тока с самовозбуждением регулировать ток возбуждения целесообразно посредством магнитных усилителей (дресселей с подмагничиванием).

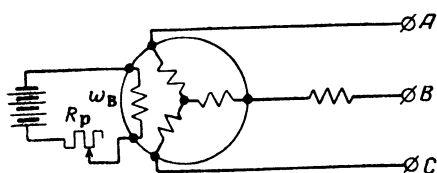
б) Генераторы переменного тока с независимым возбуждением. Машины с посторонним возбуждением получают постоянный ток от аккумуляторной батареи, сети постоянного тока или особого генератора.

На фиг. 9.13 изображена схема возбуждения генератора переменного тока от независимого источника.

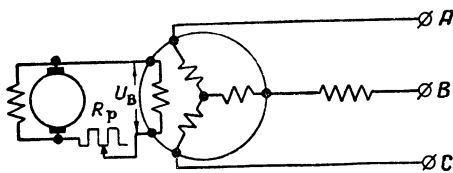
Напряжение генератора регулируется посредством изменения параметров цепи возбуждения, электрически не связанной с генератором переменного тока.

Машины с собственным возбуждением имеют в качестве источника постоянного тока, которым питается обмотка возбуждения, особый генератор, сидящий на одном валу с машиной. Этот генератор постоянного

тока, называемый возбудителем, имеет в большинстве случаев параллельное возбуждение. Изменение тока возбуждения осуществляется здесь (фиг. 9.14) изменением сопротивления R_p в цепи якоря возбудителя. Напряжение возбудителя остается в этом случае постоянным. Однако изменение тока возбуждения генератора переменного тока можно осуществлять, изменяя напряжение возбудителя, для чего реостат R_p необходимо включить в цепь обмотки возбуждения возбудителя.



Фиг. 9.13. Схема возбуждения генератора переменного тока от независимого источника.

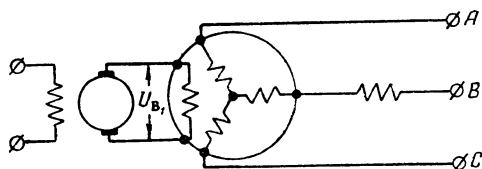


Фиг. 9.14. Схема возбуждения от генератора постоянного тока с шунтовым возбуждением.

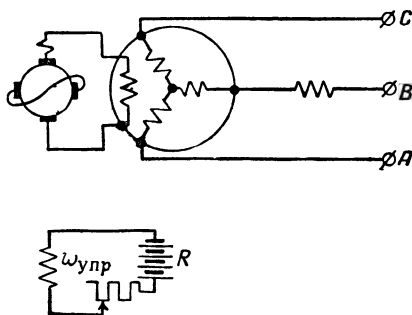
Для повышения устойчивости возбуждения возбудителя вместо параллельного применяется независимое возбуждение.

Схема фиг. 9.15 дает большую устойчивость возбуждения, так как напряжение $U_{в.в.} = \text{const}$. Недостатком этой схемы является необходимость применения реостата с большим сопротивлением, для того чтобы можно было регулировать ток возбуждения возбудителя в тех же пределах, что и при параллельном возбуждении. В этом случае приходится прибегать к специальным мерам для повышения устойчивости самовозбуждения подвозбудителя.

Преимущество независимого возбуждения возбудителя состоит в том, что при нем устраняется возможность перемангничивания возбудителя, которое может наступить при внезапных коротких замыканиях синхронного генератора.



Фиг. 9.15. Независимое возбуждение возбудителя синхронного генератора.



Фиг. 9.16. Схема возбуждения генератора переменного тока от электромашиного усилителя.

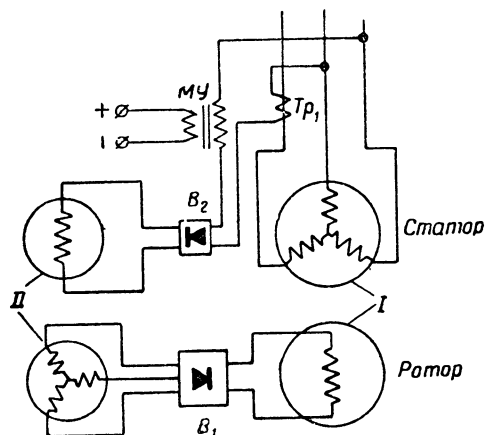
Для возбуждения генератора переменного тока может служить также электромашинный усилитель (фиг. 9.16). Регулирование возбуждения генератора переменного тока осуществляется в этом случае с помощью изменения тока в управляющей обмотке электромашинного усилителя, подключенной к постороннему источнику постоянного тока. Если постоянный источник постоянного тока отсутствует, то можно осуществить и самовозбуждение электромашинного усилителя. В последнем случае электромашинный усилитель в отличие от обычных электромашинных усилителей должен обладать остаточным магнетизмом.

Сравнивая описанные системы возбуждения генераторов переменного тока, можно заметить, что основной недостаток системы возбуждения от постороннего источника постоянного тока заключается в том, что выход

из строя источника постоянного тока неминуемо ведет к отказу всей системы переменного тока. Наиболее приемлемым является возбуждение от собственного возбудителя, так как при этом генератор с возбудителем является отдельной независимой установкой. Однако к недостаткам этой

системы относится больший ее вес; если в качестве возбудителя применяется генератор постоянного тока, то наличие коллектора и щеток у него снижает высотность системы энергоснабжения.

Высотность возбудительной системы самолетных генераторов переменного тока можно значительно повысить, если в качестве возбудителя генератора используется дополнительный генератор переменного тока с неподвижной магнитной системой и вращающимся якорем, сидящим на валу главного генератора переменного тока и направляющим свой ток через сухие малогабаритные выпрямители (германиевые или кремниевые) в обмотку возбуждения генератора. Выпрямители, включаемые в цепь якоря возбудителя, также располагаются на валу генератора. Питание системы воз-



Фиг. 9.17. Бесконтактная система возбуждения трехфазного генератора.

I—генератор трехфазного тока с вращающимся индуктором, *II*—возбудитель с вращающимся якорем и неподвижной магнитной системой, *B*₁—полупроводниковый выпрямитель, расположенный на валу ротора, *B*₂—выпрямитель в цепи возбуждения возбудителя, *МУ*—магнитный усилитель, *Тр*₁—трансформатор тока.

буждения возбудителя генератора осуществляется от постороннего источника постоянного тока и от самого генератора переменного тока через выпрямитель. В последнем случае регулирование тока возбуждения возбудителя может производиться с помощью магнитного усилителя, включаемого до выпрямителя (фиг. 9.17).

§ 9.4. СПОСОБЫ ПРИВОДА САМОЛЕТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Как известно, для получения переменного тока постоянной частоты ($f = \text{const}$) необходимо синхронные генераторы вращать с вполне определенной постоянной скоростью. Если на самолетах устанавливается несколько генераторов переменного тока, предназначенных для параллельной работы, то все генераторы должны вращаться строго с постоянной одинаковой скоростью. Выполнение этого требования вызывает большие технические трудности, если механическую энергию для приведения во вращение основных синхронных генераторов приходится отбирать от основных авиадвигателей, скорость вращения которых не остается постоянной, а изменяется в зависимости от режима полета самолета.

Гораздо легче решается задача при автономном приводе синхронных генераторов, т. е. приводе генераторов от отдельных двигателей, не связанных энергетически с главными авиационными двигателями. Но, как показано ниже, применение автономных двигателей для привода допустимо лишь для резервных и вспомогательных источников переменного тока, но не для основных генераторов, имеющих значительно большую мощность, чем вспомогательные.

Привод с отбором энергии от авиадвигателей

Для приведения во вращение с постоянной скоростью основных генераторов переменного тока с использованием энергии авиадвигателей могут применяться лишь такие устройства, которые позволяли бы не только производить отбор энергии от авиадвигателя, но и преобразовывать ее в механическую с определенными качественными показателями, характеризующимися постоянством скорости вращения.

К таким устройствам относятся:

1. Механические передачи с постоянной скоростью вращения на выходе.

2. Гидромеханические приводы или гидромуфты постоянной скорости.

3. Гидравлические трансмиссии.

4. Воздушные турбины.

5. Газовые турбины.

6. Электрические системы привода и преобразования.

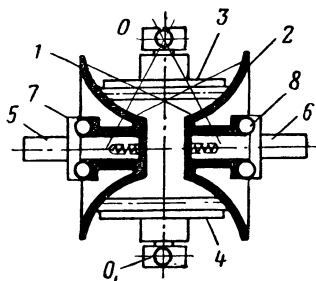
Механические передачи с постоянной скоростью вращения на выходе. Устройство этих передач основано на различных принципах, которые широко используются в так

называемых вариаторах, т. е. механических передачах, служащих для непрерывного регулирования скорости вращения различного рода рабочих машин, в случаях когда источником механической энергии для привода этих машин являются двигатели, вращающиеся с постоянной скоростью. Так как такие вариаторы обладают свойством обратимости, то, естественно, они могут иметь

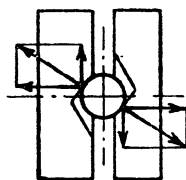
на выходе постоянную скорость при изменяющейся скорости на входе.

На фиг. 9.18 приведена схема принципиального устройства механических (фрикционных) бесступенчатых передач системы В. А. Светозарова. Эти передачи, нормальная схема которых изображена на фиг. 9.18, имеют два соосных встречно расположенных шкива 1 и 2 с конусно-вогнутыми рабочими поверхностями (чашками). По шкивам катятся ролики 3 и 4, поворачиваемые для изменения передаточного отношения вокруг центров O и O_1 , являющихся центрами кривизны дуг, образующих рабочие поверхности шкивов 1 и 2. Крутящие моменты со шкивов 1 и 2 передаются на валы 5 и 6 через шарики 7 и 8, лежащие в наклонных канавках шайб, соединенных с валами или шкивами. Под действием крутящих моментов шарики стремятся катиться по наклонным краям канавок (лунок), как показано на фиг. 9.19, и, раздвигая шайбы, создают автоматическое прижатие чашек к роликам с усилием, пропорциональным передаваемым моментам.

На фиг. 9.20, а, б показано, каким образом в передаче с принятой формой шкивов можно получить качение с весьма малым скольжением при различных передаточных отношениях. Здесь проведены образующие конусов, касательных к средним окружностям рабочих поясков роликов. Соотношение размеров фрикционных шкивов и роликов выбирается так, чтобы вершина конуса при качении ролика перемещалась по дуге, дваж-



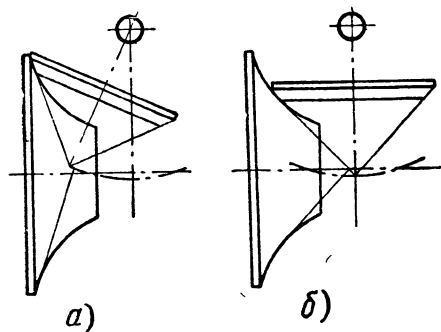
Фиг. 9.18. Нормальная схема механической бесступенчатой передачи.



Фиг. 9.19. Схема действия устройства автоматического прижатия.

ды пересекающей ось чашек и незначительно от нее отходящей. Так как ось чашек является геометрическим местом вершин всех конусов, касательных к их рабочим поверхностям, то при всех положениях роликов происходит качение, близкое по характеру к качению конусов с совпадающими или незначительно не совпадающими вершинами. Это дает возможность осуществить качение с ничтожным скольжением, обычно составляющим доли процента от скорости качения.

В качестве фрикционных материалов применяются две пары: а) при упрощенном изготовлении шкивы (чашки) делаются из сырой стали, а ролики вырезаются из текстолитовой пластины; б) при более квалифицированном изготовлении чашки и ролики делаются из твердо закаленной шлифованной стали. В обоих случаях фрикционные детали работают без смазки.



Фиг. 9.20. Схемы, поясняющие получение малого скольжения.

ления деталей в передаче применены самоустанавливающиеся и регулируемые узлы, обеспечивающие правильное распределение нагрузок и правильное взаимное положение деталей.

Передачи по нормальной схеме строятся с диапазоном регулирования от 4 до 8.

Аналогичными по принципу устройства строятся передачи системы Хейса (Haise), предназначенные для привода авиационных генераторов переменного тока на английских самолетах.

Конструктивная схема такой передачи изображена на фиг. 9.21. На ведущем валу 3 жестко закреплены два ведущих шкива 1 и 2, рабочие поверхности которых представляют собой части поверхности торов. С помощью роликов 5 и 6 движение рабочих шкивов передается к ведомому шкиву 4, рабочие поверхности которого являются также частями поверхности торов. Отношение скорости вращения ведомого шкива 4 к ведущим 1 и 2 обратно пропорционально отношению радиусов касания роликов к соответствующим шкивам.

$$\frac{n_4}{n_{1,2}} = \frac{r}{R}.$$

Благодаря двухстороннему расположению роликов 5 и 6 относительно ведомого шкива 4 подшипники передачи разгружаются от осевых усилий.

На фиг. 9.21 изображена одна пара роликов 5, 6, на самом деле их три пары, и они расположены симметрично под углом 120° друг к другу. Выходной шкив 4 связан с выходным валом 11 с помощью чаши 7. Ведущий вал 3 связан с валом двигателя 10 с помощью шарикового устройства 8, служащего для автоматического регулирования прижатия роли-

ков 5 и 6 к шкивам, а с помощью пружинящих шайб 9 осуществляется их предварительное прижатие. Угловое положение осей роликов 5 и 6 — α — можно плавно изменять посредством поворота этих осей относительно точек O и O_1 . При этом будет плавно изменяться отношение радиусов касания роликов со шкивами, а следовательно, и коэффициент редукции. Эти передачи снабжаются регулятором с гидравлическим сервомотором для автоматического поддержания постоянной скорости вращения на выходе при изменении скорости вращения на входе от 3000 до 10 000 об/мин. Передача для самолетного синхронного генератора мощностью в 30 ква при $n=8000$ об/мин = const имеет габаритные размеры $40 \times 30 \times 30$ см, вес — около 40 кг. К. п. д. этой передачи $\eta=0,85$, срок службы не менее 500 час.

Механические передачи пока еще не нашли широкого применения в приводах самолетных генераторов переменного тока.

Гидравлический привод. Гидромеханические и гидравлические приводы, служащие для приведения во вращение самолетных генераторов, состоят из следующих основных элементов:

1. Устройства для отбора механической энергии от авиационного двигателя.

2. Гидронасоса.

3. Гидродвигателя.

4. Регулирующего устройства.

5. Предохранительных устройств.

6. Гидропроводов.

7. Резервуаров для жидкости.

Рабочей жидкостью в гидроприводах является специальное масло, обладающее малой вязкостью при низких температурах.

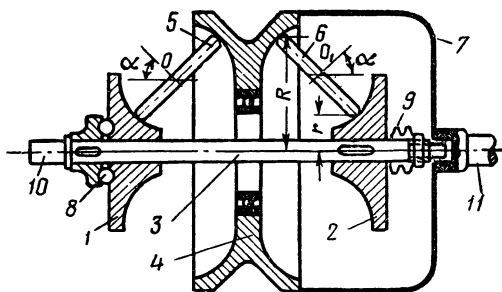
Устройство для отбора механической энергии от авиационного двигателя выполняется в виде набора зубчатых колес, посредством которых осуществляется передача вращения от главного вала авиадвигателя к входному валу гидропривода.

Если гидропривод вместе с генератором может быть расположен на торцевой части авиадвигателя, то целесообразно иметь гидромеханический привод, т. е. гидропривод дифференциального типа; в этом случае передача вращения от авиадвигателя осуществляется посредством гидромеханической муфты.

При невозможности размещения всего гидропривода вместе с генератором на корпусе самолета приходится или ограничиваться установкой на корпусе двигателя лишь одного элемента гидропривода — гидронасоса, или осуществлять передачу механической энергии посредством длинного вала к гидроприводу, располагаемому отдельно от авиадвигателя.

Гидронасос в системе гидропривода является основным элементом. В приводах для самолетных генераторов находят применение главным образом гидронасосы поршневого или шестеренчатого типа. Поршневые насосы имеют регулируемую производительность за один ход движения, шестеренчатые — постоянную производительность за один оборот.

Поршневые гидронасосы переменной производительности выполняются обычно в виде цилиндрического блока с объемными цилиндриче-

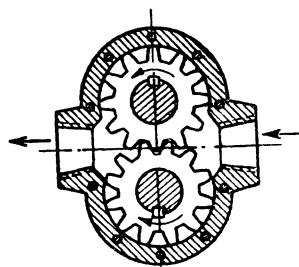


Фиг. 9.21. Механическая передача Хэйса.

скими камерами, внутри которых ходят поршни. Штоки поршней шарнирно или опорно связаны с диском, изменением угла наклона плоскостей которого по отношению к оси вращения достигается регулирование длины хода поршней.

Шестеренчатый насос (фиг. 9. 22) весьма прост по конструкции и состоит из корпуса с патрубками для подвода и отвода масла, в котором вращаются два зубчатых колеса. Зубчатые колеса плотно пригнаны к стенкам корпуса и имеют подогнанное зацепление, так что в неподвижном состоянии они не пропускают масло из одной половины корпуса в другую. При вращении зубчатых колес масло заполняет впадины между зубцами у стенок корпуса и переносится из всасывающей области в нагнетающую. Обратное движение масла по линии сцепления зубчатых колес отсутствует, так как впадины одного из колес заполняются зубцами сопряженного зубчатого колеса.

Гидродвигатель служит для приведения (непосредственно или через зубчатую передачу) во вращение генератора. По конструкции они сходны с гидронасосами поршневого типа, но отличаются от последних тем, что имеют неизменное потребление масла за один оборот, равное максимальной производительности насоса.



Фиг. 9. 22. Шестеренчатый насос.

Регулирующие устройства гидропривода служат для поддержания постоянства скорости вращения. Они состоят из гидравлических и электрических элементов. Применяются два способа регулирования скорости вращения: изменением производительности насоса и клапанное или дроссельное регулирование.

В гидроприводах самолетных генераторов используется первый способ регулирования, как более экономичный. Регулирование по второму способу сопровождается большими потерями, в случае когда имеется большая разность между скоростями вращения на входе и выходе.

Электрическими элементами регуляторов являются различные датчики и органы управления.

Предохранительные устройства предназначаются для защиты всех гидравлических элементов и гидравлической сети от повышения давления циркулирующего масла свыше допустимых пределов. Эта защита осуществляется сбрасывающими и перепускными клапанами или регуляторами, понижающими производительность насоса.

Гидропроводы (или маслопроводы) соединяют гидронасос с гидродвигателем и регуляторами. Конструктивно они выполняются по возможности минимальной длины, для чего гидродвигатель всемерно приближают к гидронасосу и часто устанавливают их в одном корпусе.

Гидроприводы можно классифицировать по типам гидронасосов и гидродвигателей, разновидностей которых имеется большое число. Но удобнее рассматривать две обособленные группы гидроприводов соответственно приведенным выше типам регулирования:

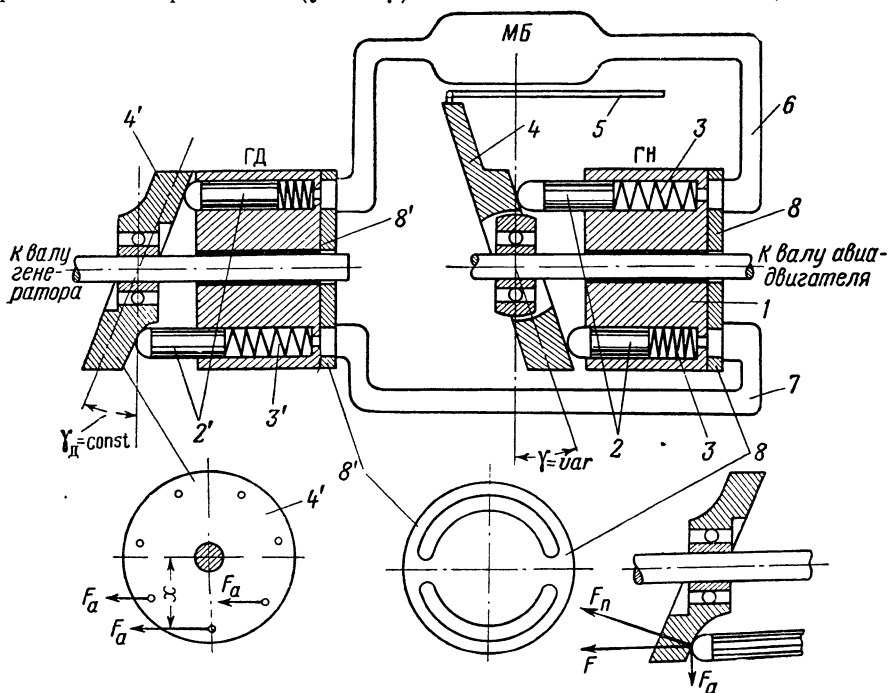
- 1) гидроприводы с клапанным (дроссельным) регулированием;
- 2) гидроприводы с регулированием производительности насоса.

В первую группу входят как насосы постоянной производительности, так и насосы переменной производительности. Во вторую группу входят только насосы переменной производительности.

В качестве примера гидравлического привода самолетных синхронных генераторов может служить устройство, принципиальная схема которого изображена на фиг. 9. 23.

Гидропривод состоит из гидронасоса переменной производительности ГН, связанного с валом авиадвигателя, и гидродвигателя ГД, сцепленного с валом синхронного генератора. Ротор гидронасоса 1 имеет цилиндрические объемные полости, в которых могут перемещаться поршни гидронасоса 2. Поршни гидронасоса вращаются вместе с ротором 1, причем пружины 3 стремятся отжать поршни в левое крайнее положение.

На валу гидронасоса укреплен невращающийся наклонный диск (качающаяся шайба) 4, угол наклона которого к прямой, перпендикулярной оси гидронасоса (угол γ) можно изменять с помощью тяги 5.



Фиг. 9.23. Схема гидравлического привода.

Объемные камеры цилиндров ротора гидронасоса сообщаются с трубопроводами высокого давления 7 и низкого давления 6 через дугообразные прорезы (с углом обхвата около 150°), расположенные на неподвижном делительном диске гидронасоса 8. Вид сбоку этого делительного диска изображен на фиг. 9.23 снизу. В местах перемычек между отверстиями делительного диска происходит так называемая отсечка масла.

Масло переносится цилиндром из всасывающей области в нагнетающую именно в точках отсечек, поэтому для определения подачи масла за оборот надо вычислить разность между объемами масла в цилиндрах в положениях верхней и нижней отсечек. Отсечки всегда располагаются на таком участке, где объем масла в цилиндре при прохождении над перемычкой не меняется.

Для определения указанной выше разности объемов необходимо знать разность в линейных перемещениях поршней в тех же точках, называемую ходом поршня h в см.

Каждый поршень за один оборот подает объем масла q_1 , равный

$$q_1 = \frac{\pi d^2}{4} h, \quad (9.17)$$

где d — диаметр поршня в см;
 h — ход поршня в см.

Для m поршней и n оборотов в минуту минутная подача масла Q составляет

$$Q = \frac{\pi d^2 h m n}{4} \text{ см}^3/\text{мин.} \quad (9.18)$$

Из фиг. 9.23 видно, что ход поршня равен

$$h = D \operatorname{tg} \gamma, \quad (9.19)$$

где D — диаметр окружности, по которой расположены оси поршней;

γ — угол наклона диска.

Следовательно,

$$Q = \frac{\pi d^2 m n D \operatorname{tg} \gamma}{4} \text{ см}^3/\text{мин.} \quad (9.20)$$

Изменяя угол наклона диска γ , можно плавно регулировать производительность насоса. Когда диск занимает положение, перпендикулярное оси вала, то ход поршня равен нулю, и подача масла отсутствует. Если угол γ отрицательный, т. е. диск наклонен в обратную сторону, направление подачи масла изменяется, так как всасывающее и нагнетательное отверстия меняются местами.

Аналогичную конструкцию имеет гидродвигатель ГД, за исключением того, что неподвижный диск гидродвигателя 4' имеет постоянный угол наклона γ_n к оси гидродвигателя, поэтому в гидродвигателе происходит постоянное потребление масла за один оборот.

При вращении ротора гидронасоса от вала авиадвигателя поршни 2 обкатываются по наклонной шайбе 4 и совершают возвратно-поступательное движение.

Те поршни, объемные камеры которых сообщаются в данный момент с верхним дугообразным вырезом распределительной шайбы 1 под действием пружин 3 движутся влево и засасывают масло из масляного бака МБ через трубопровод низкого давления 6. Те же поршни, объемные камеры которых в данный момент сообщаются с нижним дугообразным вырезом распределительной шайбы 8, под нажимом наклонной шайбы 4 перемещаются вправо и выталкивают масло через трубопровод высокого давления 7 в объемные камеры ротора гидродвигателя.

Масло, поступающее через нагнетательное отверстие делительного диска в цилиндр гидродвигателя 3', под давлением p кг/см² давит на каждый поршень 2' с силой F , равной

$$F = p \frac{\pi d^2}{4} \text{ кг.} \quad (9.21)$$

Эту силу можно разложить для любого местоположения поршня на две взаимно перпендикулярные составляющие в плоскости, перпендикулярной оси качания диска: на нормальную составляющую F_n , вызывающую реакции опор диска, и на составляющую F_a , перпендикулярную оси вращения. Из фиг. 9.23 следует

$$F_a = F \sin \gamma_{дв}. \quad (9.22)$$

Для каждого поршня сила F_a действует на плече, зависящем от положения поршня относительно диска. Если положение места касания поршня к диску охарактеризовать дугой α , пройденной им от точки верхней отсечки, то это плечо будет равно x :

$$x = \frac{D}{2} \sin \alpha = R \sin \alpha. \quad (9.23)$$

Момент силы F_a относительно оси вращения, перпендикулярной диску, составит

$$M_1 = R F_a \sin \gamma_{\text{дв}} \sin \alpha. \quad (9.24)$$

Вращающий момент одного цилиндра пульсирует от 0 при $\alpha=0$ до M_{max} при $\alpha = \frac{\pi}{2}$. Средний момент, создаваемый одним цилиндром за оборот, определяется по формуле

$$M_{1\text{ср}} = \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\pi} F_{\text{н}} R \sin \gamma_{\text{дв}} \sin \alpha d\alpha - \int_{\pi}^{2\pi} F_{\text{в}} R \sin \gamma_{\text{дв}} \sin \alpha d\alpha \right] = \\ = \frac{1}{\pi} R \sin \gamma_{\text{дв}} (F_{\text{н}} - F_{\text{в}}) = \frac{1}{\pi} F_p R \sin \gamma_{\text{дв}}, \quad (9.25)$$

где $F_{\text{н}}$ — сила давления в нагнетающем отверстии;

$F_{\text{в}}$ — сила давления во всасывающем отверстии;

F_p — разность между силами давлений.

Средний суммарный момент от m цилиндров равен

$$M = \frac{m F_p R \sin \gamma_{\text{дв}}}{\pi}. \quad (9.26)$$

Наличие нескольких равномерно распределенных по окружности цилиндров снижает пульсацию суммарного момента до величины 1—2% (при $m=9$ поршнях).

Под влиянием вращающего момента M блоки цилиндров с поршнями приходят во вращение.

Потребление масла гидродвигателем в минуту определяется по формуле аналогично производительности насоса [формула (9.20)]:

$$Q_{\text{дв}} = \frac{\pi d^2 m n_{\text{дв}} D \operatorname{tg} \gamma_{\text{дв}}}{4}. \quad (9.27)$$

Если приравнять подачу масла насосом сумме потребления масла гидродвигателем и утечек, то получают следующую формулу:

$$(1-S) Q = Q_{\text{дв}}, \quad (9.28)$$

где S — утечка масла в долях единицы.

Подставляя величины Q и $Q_{\text{дв}}$ из формул (9.20) и (9.27) и производя сокращение равных коэффициентов, находят

$$(1-S) n \operatorname{tg} \gamma = n_{\text{дв}} \operatorname{tg} \gamma_{\text{дв}}, \quad (9.29)$$

откуда

$$n_{\text{дв}} = \frac{1-S}{\operatorname{tg} \gamma_{\text{дв}}} n \operatorname{tg} \gamma. \quad (9.30)$$

Так как величина скольжения S , вызванного утечкой, обычно не превышает 5% и ее колебаниями можно во время работы пренебречь, то, объединяя принятые постоянными величины в предыдущей формуле в один общий коэффициент k , получают

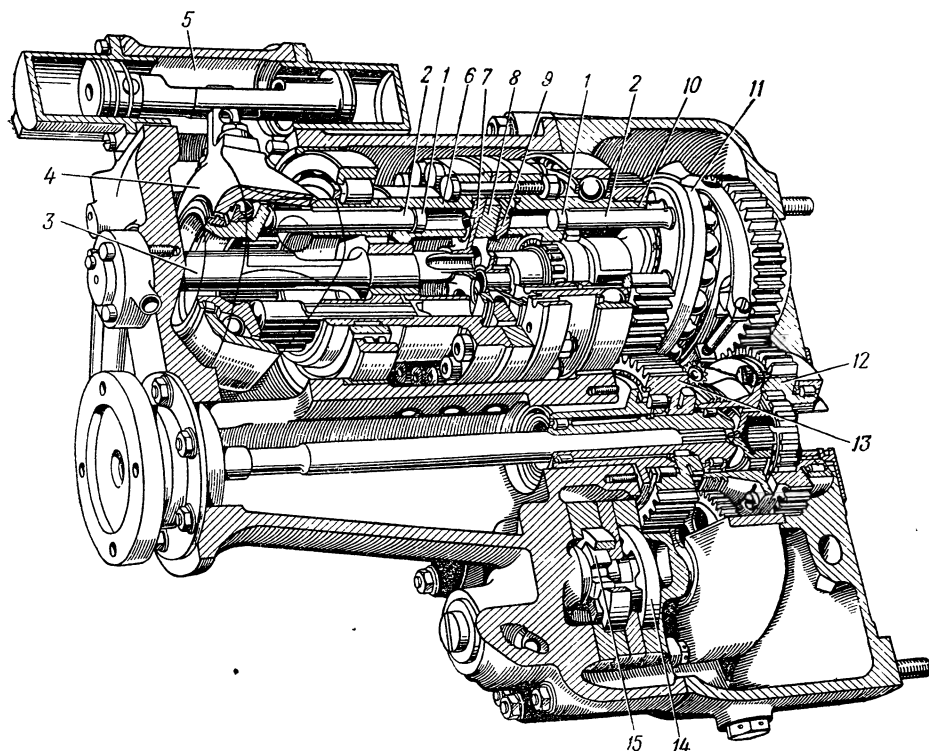
$$n_{\text{дв}} = k n \operatorname{tg} \gamma, \quad (9.31)$$

где

$$k = \frac{1-S}{\operatorname{tg} \gamma_{\text{дв}}}. \quad (9.32)$$

Таким образом, скорость вращения гидродвигателя пропорциональна тангенсу угла наклона диска гидронасоса.

В гидроприводах возможна установка гидронасоса и гидродвигателя в общем кожухе и раздельно. В первом случае кожух заполняется маслом под давлением около 3 ат. Давление масла в цилиндрах может достигать 175 кг/см^2 при нагнетании; при этом возможны утечки масла из цилиндров в кожух, но они восполняются по тем же зазорам при всасывании, когда давление в кожухе превышает давление в цилиндрах. При раздельной установке насоса и гидродвигателя утечки восполняются спе-



Фиг. 9.24. Устройство гидромеханического привода.

1 и 2—поршни двигателя и насоса, 3—вал главного ротора, 4—качающийся диск с изменяемым углом наклона, 5—цилиндр регулятора повышенной и пониженной скорости, 6—остов поршневого цилиндра, 7—распределительная клапанная шайба насоса, 8—распределительная клапанная шайба двигателя, 9—распределительная клапанная шайба двигателя, 10—остов двигателя, 11—качающийся диск с постоянным углом наклона, 12—выходная муфта и зубчатое колесо привода, 13—входное зубчатое колесо, 14—нагрузочный насос, 15—откачивающий насос.

циальным шестеренчатым насосом, подающим масло в область всасывания.

Современные гидромеханические приводы (трансмиссии) (см. фиг. 9.24 и 9.25) позволяют получать постоянную скорость вращения на выходе при изменении скорости вращения на входе в диапазоне от 2,5—1 до 3,5—1. Скорость вращения на выходе обычно равна 6000 об/мин; скорость вращения на входе составляет 8100—3000 и 10 500—3000 об/мин.

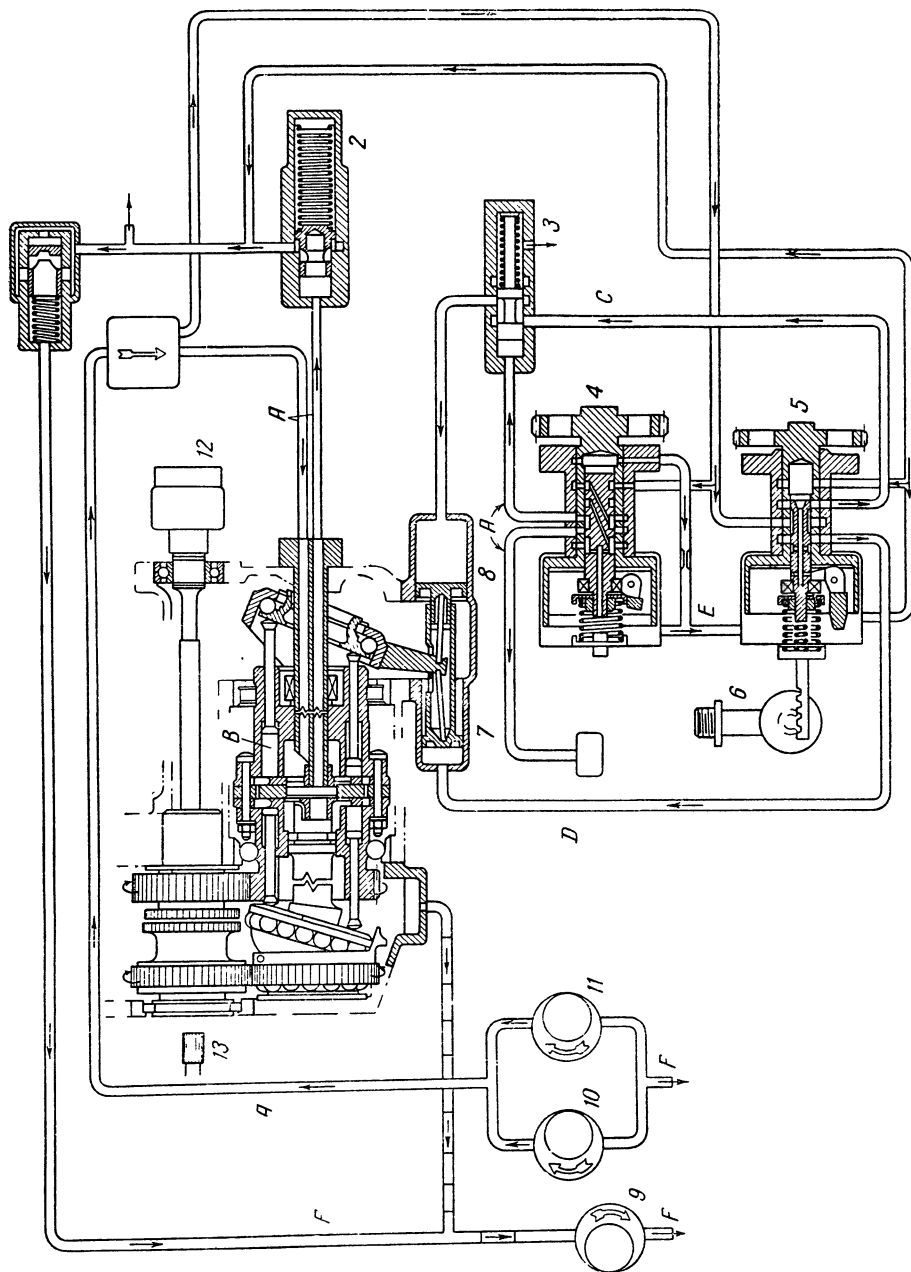
На фиг. 9.26 приведен общий вид агрегата, состоящего из гидромеханического привода и синхронного генератора мощностью в 40 ква. Вес этого агрегата составляет около 70 кг.

Современные гидромеханические приводы, снабженные автоматическими регуляторами, позволяют поддерживать постоянство скорости вращения генераторов переменного тока с отклонением в $\pm 0,5\%$ в статическом состоянии; при переходных же режимах угловые ускорения вызы-

Фиг. 9.25. Общая схема устройства управления гидромеханическим приводом для генераторов переменного тока.

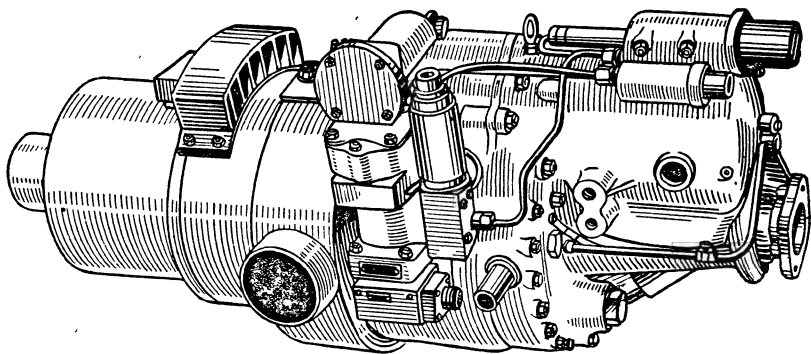
А—нагнетающий трубопровод, В—рабочее давление, С—давление для регулирования при повышении скорости двигателя, D—давление для регулирования при понижении скорости двигателя, E—давление масла, F—отверстие, сообщающееся с атмосферой.

1—масляный перепускной клапан, 2—нагрузочный перепускной клапан, 3—стопорный клапан для повышения скорости, 4—регулятор для повышения скорости, 5—основной регулятор, 6—серводвигатель для регулирования частоты, 7—серводвигатель для понижения скорости вращения, 8—серводвигатель для повышения скорости вращения, 9—отсасывающий насос, 10 и 11—нагнетающий насос, 12—хвостовик входного вала, 13—хвостовик генератора переменного тока.



вают изменения частоты примерно в 4 гц (при $f=400$ гц) на каждые 1000 об/мин в секунду.

Привод от воздушной турбины. Привод самолетных синхронных генераторов от воздушных турбин стал находить применение лишь в последнее время. Воздушная турбина имеет конструкцию, аналогичную центробежному нагнетателю для подачи воздуха в герметические кабины, но она отличается от последнего тем, что в ней рабочим телом является сжатый воздух, забираемый от одной из ступеней компрессора основного авиационного двигателя. Применение привода генераторов от воздушных турбин целесообразно на самолетах с реактивными двигателями. В воздушных турбинах энергия для вращения получается за счет расширения воздуха в сопловом аппарате турбины.



Фиг. 9.26. Общий вид гидромеханического привода с трехфазным генератором мощностью 40 ква.

Максимальная мощность, развиваемая воздушной турбиной, оказывает влияние на тягу реактивного двигателя и зависит также от коэффициента полезного действия.

Большим достоинством привода синхронных генераторов от воздушных турбин является возможность охлаждения генератора воздухом, отработанным в воздушной турбине. При расширении воздуха в воздушной турбине температура его значительно снижается, и он может быть использован для охлаждения. Этим решается серьезная проблема охлаждения генераторов на больших высотах и при больших скоростях полета.

К недостаткам привода от воздушных турбин относятся трудности регулирования скорости вращения при различных режимах полета вследствие необходимости отбирать сжатый воздух от различных ступеней компрессора турбореактивного двигателя. Хотя доля сжатого воздуха, отбираемого для воздушной турбины, в общей массе воздуха, сжимаемого компрессором турбореактивного двигателя, невелика, однако на больших высотах полета она может вызвать значительное снижение тяги или мощности реактивного двигателя.

На фиг. 9.27 приведены кривые, показывающие зависимость к. п. д. воздушной турбины от степени адиабатического расширения (отношения давлений). Как видно из кривых, максимальное значение к. п. д. воздушных турбин не превышает 0,6.

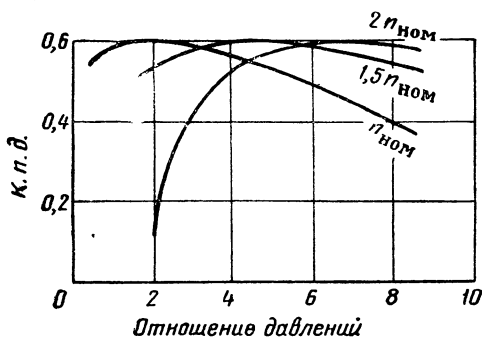
Общий вид воздушной турбины с синхронным генератором мощностью в 15 ква изображен на фиг. 9.28.

Привод от газовых турбин. Газовые турбины, применяемые для привода самолетных генераторов переменного тока, работают или на выхлопных газах от основных авиадвигателей или с использова-

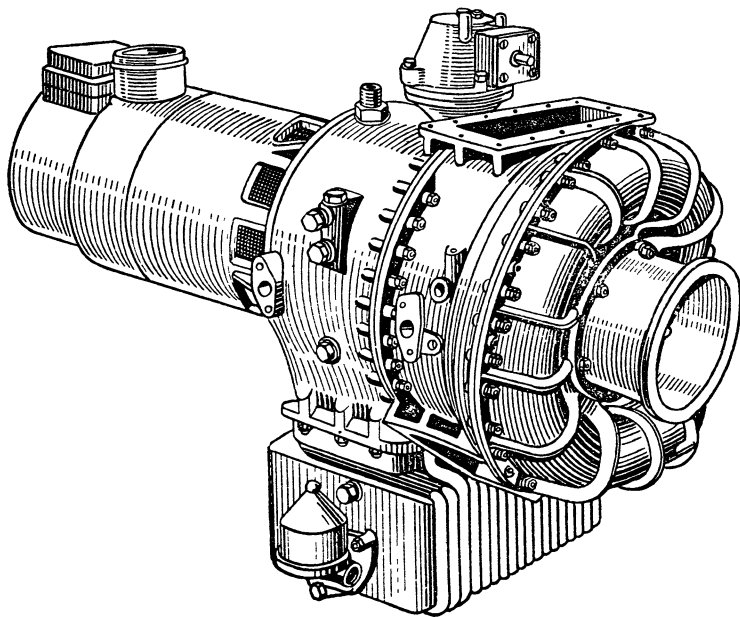
нием газов от сгорания топливо-воздушных смесей. В первом случае газовые турбины не имеют собственных камер сгорания, поэтому они получаются более простыми по устройству и обладают меньшим весом и габаритами.

Привод генератора от газовой турбины с использованием выхлопных газов тяговых авиационных двигателей имеет перспективы применения для генераторов средних мощностей. Однако необходимо иметь в виду, что отбор выхлопных газов для турбины в наземных условиях снижает мощность основных двигателей. В высотных условиях значительное количество выхлопных газов используется часто для газовых турбин мощностью в 100—200 кВт для привода нагнетателей; кроме того, при обледенениях самолета приходится производить усиленный добавочный отбор выхлопных газов, что лимитирует мощность газовых турбин самолетных генераторов.

Во втором случае, т. е. при топливном питании, устройство газовых турбин получается более сложным вследствие наличия камер сгорания и



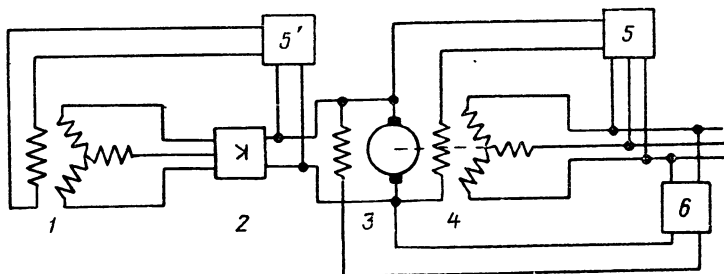
Фиг. 9.27. Зависимость к.п.д. воздушной турбины от отношения давлений на входе и выходе.



Фиг. 9.28. Воздушная турбина с генератором переменного тока мощностью 15 кВт.

необходимости иметь дополнительную аппаратуру для зажигания. Воздух для этих турбин берется от компрессора основного авиадвигателя в меньшем количестве по сравнению с тем, что требуется для воздушных турбин той же мощности. Топливом для этих турбин может служить горючее, применяемое для основных авиадвигателей.

Электрические системы привода и преобразования. Вращение синхронных генераторов с постоянной скоростью можно осуществить посредством электрического привода, в систему которого входит устройство для предварительного преобразования первичной механической энергии (от авиадвигателя) в электрическую. Имеется не-

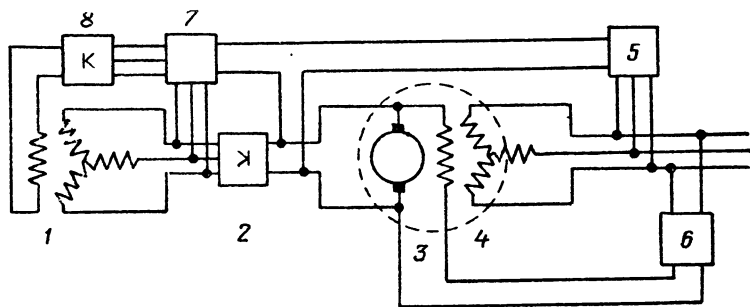


Фиг. 9.29. Схема системы электрического привода для генерирования переменного тока постоянной частоты.

1—генератор переменного тока изменяющейся частоты, 2—выпрямитель, 3—двигатель постоянного тока, 4—генератор переменного тока постоянной частоты, 5 и 5'—регуляторы напряжения, 6—регулятор частоты.

сколько различных систем электрического привода генераторов переменного тока и преобразователей частоты.

Схема одной из таких систем генерирования и преобразования переменного тока изменяющейся частоты в переменный ток постоянной частоты изображена на фиг. 9.29¹. Как видно из структурной схемы, основными элементами этой системы являются: 1 — генератор переменного тока, приводимый во вращение от авиадвигателя, 2 — устройство для преобразования переменного тока в постоянный в виде полупроводниковых (германиевых и кремниевых) или механических выпрямителей, 3 — двигатель постоянного тока, служащий для приведения во вращение



Фиг. 9.30. Схема системы электрического привода для генерирования переменного тока постоянной частоты.

1—генератор переменного тока изменяющейся частоты, 2—выпрямитель, 3—двигатель постоянного тока, 4—генератор переменного тока постоянной частоты, 5—регулятор напряжения, 6—регулятор частоты, 7—магнитный усилитель, 8—выпрямитель.

с постоянной скоростью генератора переменного тока 4 постоянной частоты, 5 и 5' — регуляторы напряжения, 6 — регулятор частоты.

Двигатель постоянного тока 3 и генератор переменного тока постоянной частоты 4 целесообразно объединять в одну электрическую машину — одноякорный преобразователь. В таком случае электрическая схема всей системы, служащей для получения переменного тока постоянной частоты, принимает вид, изображенный на фиг. 9.30.

¹ Эта система предложена М. М. Красношапкой и В. С. Кулебакиным.

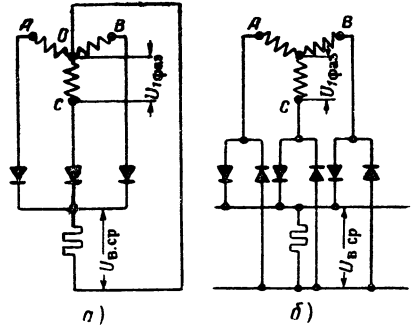
В этой системе генератор переменного тока I непосредственно или через редуктор связан с валом основного авиадвигателя и он вместе с выпрямителем служит для преобразования части механической энергии авиадвигателя в электрическую в виде постоянного тока для приведения во вращение одноякорного преобразователя с постоянной скоростью с целью получения переменного тока постоянной частоты.

Как известно, в трехфазных синхронных машинах с выпрямителем эффективное значение напряжения переменного тока $U_{1\text{пер}}$ и среднее значение напряжения постоянного тока $U_{\text{в.ср}}$ связаны между собой определенными соотношениями, зависящими от схемы включения выпрямителей. Для схемы фиг. 9. 31, а отношение

$$\frac{U_{\text{в.ср}}}{U_{1\text{фаз}}} = \frac{\sqrt{2} \sin \frac{\pi}{3}}{\frac{\pi}{3}} = 1,17; \quad (9.33)$$

для случая схемы фиг. 9. 31, б

$$\frac{U_{\text{в.ср}}}{U_{1\text{фаз}}} = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \sin \frac{\pi}{6}}{\frac{\pi}{6}} = 2,33. \quad (9.34)$$



Фиг. 9. 31. Схемы выпрямления трехфазного тока.

В одноякорном трехфазном преобразователе значения напряжений на входе и выходе также связаны между собой. При синусоидальном поле отношение напряжений при холостом ходе равно

$$\frac{U_{2\text{пер}}}{U_{\text{в.ср}}} = \frac{\sin \frac{\pi}{m}}{\sqrt{2}} = 0,612, \quad (9.35)$$

если $m=3$.

При несинусоидальном поле соотношение напряжений зависит от коэффициента полюсного перекрытия α .

$$\frac{U_{2\text{пер}}}{U_{\text{в.ср}}} = 0,62 \quad \text{при } \alpha = 0,7;$$

$$\frac{U_{2\text{пер}}}{U_{\text{в.ср}}} = 0,64 \quad \text{при } \alpha = 0,65.$$

Если одноякорный преобразователь выполнен с двумя отдельными обмотками для постоянного и переменного тока, то при определении отношения напряжений можно пользоваться следующей формулой:

$$\frac{U_{2\text{пер}}}{U_{\text{в.ср}}} = \frac{4f_{\text{в}}f_{\omega}f_{\omega_2}\Phi \cdot 10^{-8}}{\frac{N}{a}f_{\Phi} \cdot 10^{-8}} = \frac{4a\omega_2}{N}f_{\text{в}}f_{\omega}, \quad (9.36)$$

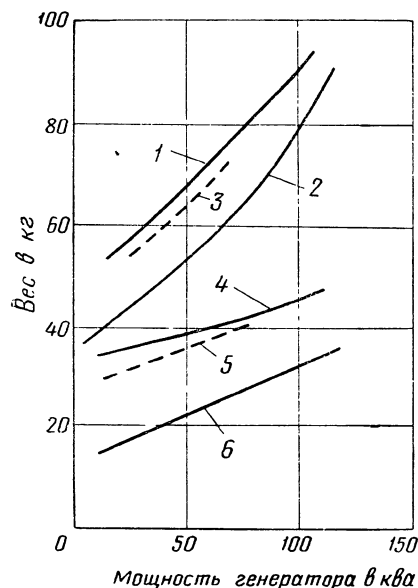
где N — число проводников обмотки постоянного тока;
 a — число пар параллельных ветвей этой обмотки;
 ω_2 — число витков фазовой обмотки переменного тока;
 $f_{\text{в}}$ — коэффициент формы кривой магнитного поля;
 f_{ω} — обмоточный коэффициент обмотки переменного тока.

Приведенные формулы показывают, что в описанной выше системе между напряжением на зажимах генератора переменного тока, приводимого во вращение основным авиадвигателем, и выходным напряжением однофазного преобразователя имеется также определенное соотношение, причем на это соотношение не влияют скорости вращения генератора и однофазного преобразователя, но оказывает влияние нагрузка и ее характеристика. Таким образом, если необходимо U_2 поддерживать постоянным, то в зависимости от нагрузки однофазного преобразователя следует установить соответствующее напряжение на зажимах основного генератора, что достигается регулированием тока возбуждения последнего.

Скорость вращения однофазного преобразователя зависит от выпрямленного напряжения и магнитного потока, поэтому для поддержания скорости вращения преобразователя на постоянном уровне необходимо регулирование осуществлять воздействием на цепь возбуждения преобразователя.

Из этих основных свойств системы генерирования и преобразования переменного тока вытекают все основные условия для автоматической стабилизации частоты, регулирования напряжения и равномерного распределения активных и реактивных мощностей в случае работы нескольких систем на общей шине переменного тока стабильной частоты.

Исследования показывают, что система генерирования переменного тока стабильной частоты, состоящая из бесконтактного генератора, выпрямителя и однофазного преобразователя, достаточно надежна и устойчива при параллельной работе. Вес такой системы мощностью 30 кВА составляет около 70 кг (при $n_1=8000-18000$ об/мин и $n_2=6000$ об/мин=const) при номинальном общем к. п. д. около 75%.



Фиг. 9.32. Веса приводов: гидромеханического, воздушной и газовой турбин.

1—турбогенератор с регулятором и с газовой турбиной, 2—то же, с воздушной турбиной, 3—синхронный генератор с гидромеханическим приводом, 4—газовая турбина на 12 000 об/мин, 5—гидромеханический привод, 6—воздушная турбина на 24 000 об/мин

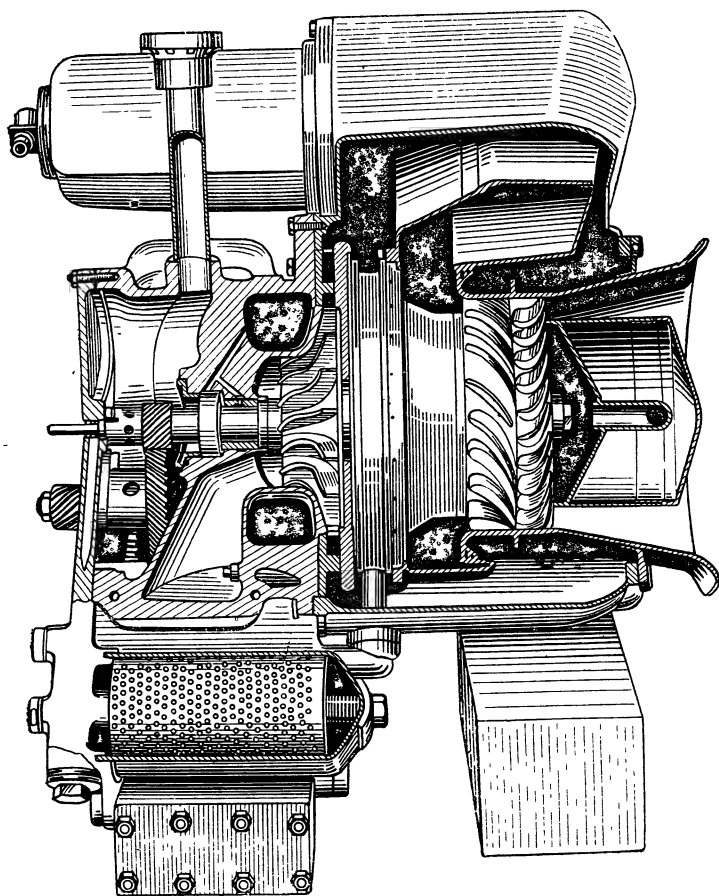
Системы генерирования переменного тока постоянной частоты с преобразованием частоты посредством электронных и ионных приборов не нашли применения на самолетах. Но открываются широкие перспективы инвертирования с помощью силовых полупроводниковых (германиевых или кремниевых) триодов, появления которых можно ожидать в ближайшее время.

На фиг. 9.32 приведена диаграмма, иллюстрирующая весовые данные различных систем приводов генераторов переменного тока¹.

Автономный привод. Автономный привод применяется главным образом для резервных генераторов переменного тока. Генерирование запасной энергии может потребоваться для обеспечения энергией жизненно необходимых электрических установок в случае выхода из строя или выключения основных генераторов во время полета или для питания группы потребителей во время посадки или при стоянке самолетов на земле.

¹ Journal of the Royal aeronautical Society, Sept., 1955.

В качестве двигателей автономных самолетных генераторных установок могут использоваться различные двигатели внутреннего сгорания. Сравнительный анализ двигателей для этих установок в отношении веса, высотных характеристик, общего коэффициента полезного действия и надежности работы показывает преимущества использования агрегата, состоящего из одноступенчатой газовой турбины с радиальным подсосом воздуха и быстроходного генератора переменного тока.

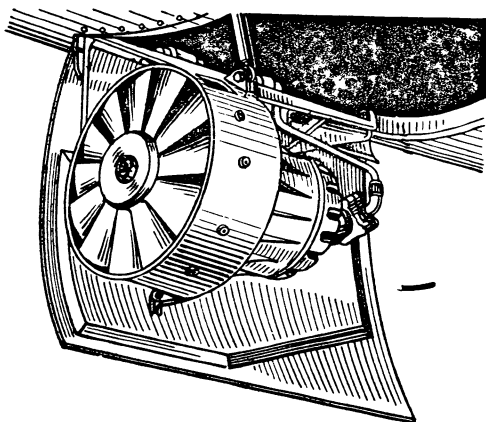


Фиг. 9.33. Газовая турбина Ровера.

Агрегаты подобного типа со скоростью вращения в 24 000 об/мин обладают малым весом, небольшими размерами и наиболее простой конструкцией (фиг. 9.33). Несмотря на эти достоинства, газотурбинные установки ограничены по мощности на больших высотах, поэтому на больших реактивных самолетах в качестве запасных источников переменного тока используются агрегаты, состоящие из генератора и жиклерно-воздушной турбины. Эти турбины получают воздух от компрессоров основных авиадвигателей, поэтому они могут работать и на больших высотах, так как вероятность выбытия из строя всех основных авиадвигателей мала.

За последнее время на реактивных самолетах стали применяться для привода запасных генераторов многолопастные ветряки, приходящие во вращение под действием потока встречного воздуха. Во избежание увеличения лобового сопротивления самолета эти автономно действующие

агрегаты помещаются в закрывающихся люках фюзеляжа самолета, из которых они выпускаются при пуске в ход (фиг. 9.34). Безопасный выпуск этих агрегатов может производиться при скоростях, доходящих до 1200 км/час.



Фиг. 9.34. Выпускающийся многолопастный ветряк для привода генератора переменного тока.

Автономные резервные электрические агрегаты запускаются автоматически, причем время приведения в действие агрегатов, при котором генератор начинает осуществлять нормальное обеспечение энергией, составляет 1—2 сек.

Все автономные агрегаты, как правило, должны быть снабжены автоматическими регуляторами напряжения, синхронизаторами и стабилизаторами частоты.



Глава X

РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ САМОЛЕТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 10. 1. ОСОБЕННОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ САМОЛЕТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Основными проблемами с точки зрения регулирования и управления при применении на самолете переменного тока являются:

- 1) регулирование напряжения и распределения реактивной мощности между параллельно работающими генераторами;
- 2) регулирование частоты и распределения активной мощности между параллельно работающими генераторами;
- 3) синхронизация и включение генераторов на параллельную работу.

Для решения общей проблемы регулирования напряжения с учетом распределения реактивной мощности параллельно работающих генераторов необходимо:

- 1) поддерживать напряжение на заданном уровне с требуемой степенью точности;
- 2) обеспечить устойчивость параллельной работы и распределение реактивных мощностей при нормальных режимах;
- 3) сохранить устойчивость параллельной работы при аварийных режимах.

Решение всех этих задач может быть достигнуто только путем соответствующего воздействия на возбуждение генераторов.

Первая задача решается путем воздействия на возбуждение генератора в зависимости от величины напряжения на его зажимах, вторая — путем воздействия на возбуждение в зависимости от величины и фазы тока нагрузки, третья — форсировкой возбуждения при коротких замыканиях с целью поддержания синхронизирующего момента (схемы ударного возбуждения).

Для регулирования напряжения самолетных генераторов с возбудителем на валу или с возбуждением от бортовой сети находят применение те же регуляторы напряжения, что и для генераторов постоянного тока.

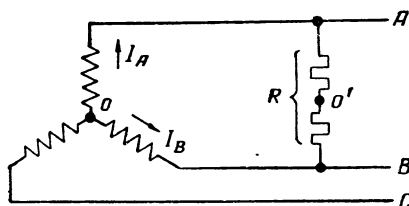
Регулирование напряжения синхронного генератора путем непосредственного воздействия на цепь возбуждения машины связано с рядом трудностей, так как для цепи возбуждения самолетного синхронного генератора требуется значительно большая мощность, чем мощность возбуждения для генератора постоянного тока. Так, например, при $\cos \varphi = 0,8$ мощность возбуждения синхронного генератора составляет 5—6% от номинальной, в то время как для генератора постоянного тока эта величина не превышает 2,0—2,5%.

В случае применения трехфазных генераторов возникает вопрос, на какое напряжение должны реагировать чувствительные органы регуля-

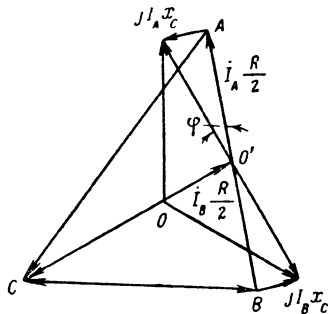
торов: на фазовое, линейное, среднее напряжение или на напряжение прямой последовательности генератора.

Непосредственное включение обмотки регулятора на линейное или фазовое напряжение генератора через выпрямитель не обеспечивает правильного регулирования возбуждения при несимметричных нагрузках.

На фиг. 10.1 изображен один из случаев несимметричной нагрузки — включение на линейное напряжение генератора чисто активной нагрузки. На фиг. 10.2 представлена векторная диаграмма, построенная для этого случая, причем величина активной нагрузки составляет 10% от номинальной. Несимметричная нагрузка искажает треугольник линейных напряжений генератора. Линейное напряжение U_{AB} уменьшается на 5%, U_{BC} на 15%, а напряжение U_{AC} возрастает на 11%. Если бы обмотка регулятора напряжения была включена на линейное напряжение U_{AC} , то регулятор снизил бы возбуждение генератора вместо того, чтобы повысить его.



Фиг. 10.1. Несимметричная нагрузка синхронного генератора.



Фиг. 10.2. Векторная диаграмма для случая несимметричной нагрузки генератора.

Аналогичные явления будут иметь место и для других несимметричных нагрузок, а также для случая включения обмотки регулятора на фазовое напряжение генератора.

Поэтому обычно применяются два способа присоединения однофазных регуляторов напряжения для регулирования напряжения трехфазных генераторов: 1) включение обмотки регулятора через трехфазную выпрямительную схему; 2) включение обмотки регулятора через фильтр напряжения прямой последовательности.

При рассмотрении вопроса о рациональности применения различных схем включения чувствительных элементов регуляторов напряжения, кроме специфических условий работы на самолете, необходимо учитывать ряд дополнительных требований:

1. Суммарная погрешность при регулировании напряжения должна находиться в пределах $\pm 2\%$. Это требование обусловлено применением на самолетах радиолокационных установок, чувствительных к изменению напряжения. Остальные устройства допускают поддержание напряжения с точностью $\pm 5\%$. Это требование должно выполняться и при непостоянстве частоты сети, потому что при номинальной активной нагрузке частота снижается приблизительно на 5%. Последнее вызывается необходимостью обеспечения равномерного распределения активной нагрузки между генераторами, работающими параллельно, для чего первичные индивидуальные двигатели или муфты постоянной скорости вращения, посредством которых генераторы приводятся во вращение, снабжаются регуляторами со статическими характеристиками.

2. Степень несимметрии напряжений не должна превышать 5%. Это условие основано на допустимой с точки зрения нагрева ротора генератора величине токов обратной последовательности.

Даже при небольшом значении напряжения обратной последовательности токи обратной последовательности достигают больших величин благодаря тому, что сопротивление обратной последовательности обычно в 8—10 раз меньше сопротивлений прямой последовательности.

В генераторе токи обратной последовательности создают значительное по величине вращающееся магнитное поле, движущееся относительно ротора с двойной синхронной скоростью. Это вызывает дополнительный нагрев ротора и обуславливает значительное снижение допустимой нагрузки генератора.

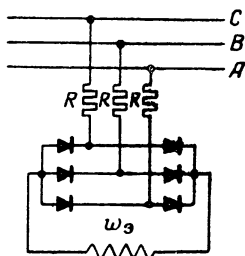
3. Должна быть предусмотрена возможность стабилизации распределения реактивных нагрузок при параллельной работе генераторов.

Возбуждение генераторов должно быть таким, чтобы $\cos \varphi$ у всех машин был один и тот же (в этом случае потери в меди машин будут минимальными).

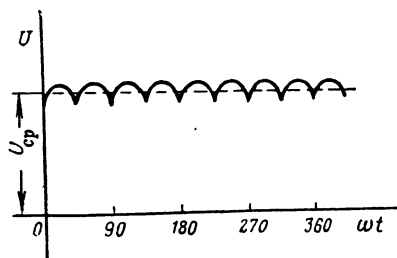
§ 10.2. ВКЛЮЧЕНИЕ ОБМОТКИ ОДНОФАЗНОГО РЕГУЛЯТОРА НАПЯЖЕНИЯ ЧЕРЕЗ ТРЕХФАЗНУЮ ВЫПРЯМИТЕЛЬНУЮ СХЕМУ

Схема включения обмотки регулятора к зажимам генератора через трехфазную выпрямительную схему проф. А. Н. Ларионова представлена на фиг. 10.3. Она состоит только из твердых выпрямителей и сопротивлений R , обеспечивающих температурную компенсацию.

Если система линейных напряжений симметрична, то в случае идеальных выпрямителей и чисто активной нагрузки кривые выпрямленных



Фиг. 10.3. Схема включения обмотки регулятора напряжения к зажимам генератора через трехфазную выпрямительную схему проф. А. Н. Ларионова.



Фиг. 10.4. Кривая напряжения выпрямленного тока при симметричной активной нагрузке трехфазного двухполупериодного выпрямителя.

тока и напряжения состояли бы из участков синусоид и имели бы вид, представленный на фиг. 10.4.

Соотношение между средним значением выпрямленного напряжения U_{cp} и эффективным значением приложенного переменного напряжения U выражается, как известно, следующей формулой:

$$U_{cp} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} m \sin \frac{\pi}{m} U, \quad (10.1)$$

где m — число выпрямленных полувольт одного периода.

При $m=6$

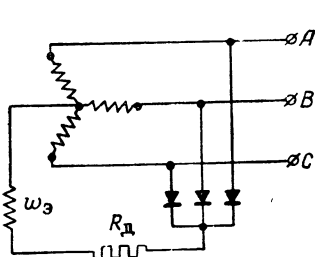
$$U_{cp} = 1,35 U. \quad (10.2)$$

Это соотношение справедливо и для работы выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку.

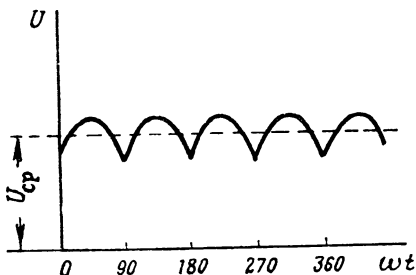
Для схемы однополупериодного выпрямителя, изображенной на фиг. 10.5,

$$U_{\text{ср}} = 1,17 U. \quad (10.3)$$

На фиг. 10.6 приведена кривая напряжения выпрямленного тока, а пунктиром указано среднее значение напряжения $U_{\text{ср}}$. Как видно из сравнения кривых фиг. 10.4 и 10.6, пульсации выпрямленного напряже-



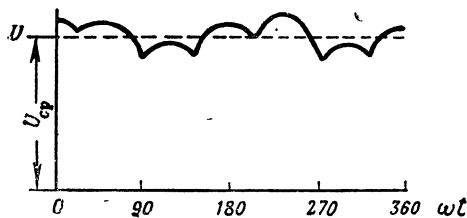
Фиг. 10.5. Схема включения обмотки регулятора напряжения к зажимам генератора через однополупериодный выпрямитель.



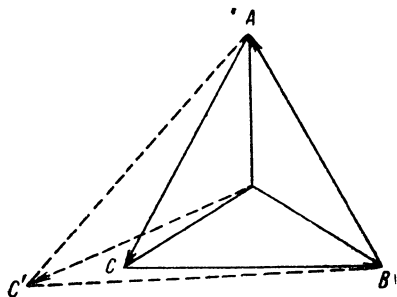
Фиг. 10.6. Кривая напряжения выпрямленного тока при симметричной активной нагрузке трехфазного однополупериодного выпрямителя.

ния в случае применения двухполупериодной схемы А. Н. Ларионова получаются меньше. Поэтому в большинстве случаев используется двухполупериодная схема.

При несимметричной нагрузке линейные напряжения получаются неравными по амплитуде и сдвинутыми друг относительно друга по фазе на углы, отличающиеся от $\frac{2\pi}{3}$, как это видно на фиг. 10.7 и из векторной диаграммы напряжений генератора, представленной на фиг. 10.8. На этой фигуре сплошными линиями изображена векторная диаграмма напряжений для случая симметрии, а пунктиром — для случая нарушения симметрии.



Фиг. 10.7. Кривая напряжения выпрямленного тока при несимметричной нагрузке выпрямителя.



Фиг. 10.8. Векторная диаграмма напряжений при несимметричной нагрузке генератора.

Среднее значение выпрямленного напряжения равно

$$U_{\text{ср}} = k \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{3}, \quad (10.4)$$

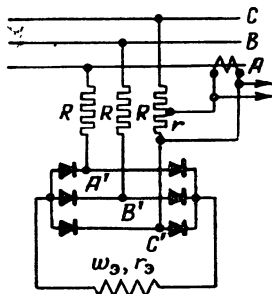
где k — коэффициент пропорциональности.

Таким образом, ток в обмотке органа реагирования регулятора напряжения пропорционален среднему арифметическому линейных напряжений генератора. Очевидно, что средняя величина выпрямленного напряжения в этом случае должна зависеть как от степени несимметрии, так и от характера несимметричной нагрузки, которой определяется

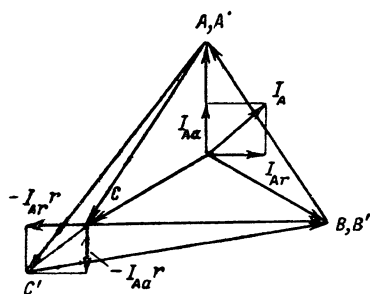
сдвиг между основными векторами напряжений прямой и обратной последовательности. Подсчеты, произведенные Б. А. Ставровским для случая несимметрии в 5 %, показали, что эта величина несимметрии вызывает погрешность, составляющую менее 0,1 %. Это свойство данной схемы весьма ценно для использования при регулировании напряжения.

Вторым положительным качеством указанной выше схемы является независимость величины выпрямленного тока от изменения частоты.

К недостаткам схемы следует отнести то, что при параллельной работе генераторов она не позволяет обеспечить равномерное распределение реактивных мощностей. Стабилизация распределения реактивных



Фиг. 10.9. Схема включения обмотки регулятора напряжения через выпрямитель и трансформатор тока.



Фиг. 10.10. Векторная диаграмма напряжений для схемы фиг. 10.9.

нагрузок осуществляется путем изменения величины напряжения, приложенного к обмотке регулятора, в зависимости от величины и фазы тока нагрузки. Для этой цели можно использовать трансформатор тока, включая его, как указано на фиг. 10.9. При этом должно быть исключено воздействие активной составляющей тока нагрузки. Как видно на векторной диаграмме, представленной на фиг. 10.10 и построенной при отсутствии нагрузки на выпрямителе, активная составляющая тока нагрузки фазы A не оказывает заметного влияния на напряжение $\dot{U}_{BC}$, так как она вызывает на сопротивлении r падение напряжения $\dot{I}_{Aa} \cdot r$, перпендикулярное $\dot{U}_{BC}$. Однако она значительно влияет на величину напряжения $\dot{U}_{CA}$, а следовательно, в конечном итоге и на напряжение, приложенное к обмотке регулятора напряжения ω_2 . Таким образом, простая схема с трансформатором тока не дает в этом случае возможности исключить воздействие активной составляющей тока нагрузки. Выделение реактивной составляющей тока нагрузки неизбежно связано со значительными усложнениями схемы, вследствие чего утрачивается ее основное преимущество — простота устройства.

§ 10.3. ВКЛЮЧЕНИЕ ОБМОТКИ ОДНОФАЗНОГО РЕГУЛЯТОРА ЧЕРЕЗ ФИЛЬТР НАПЯЖЕНИЯ ПРЯМОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Наиболее совершенным способом включения органа реагирования регулятора напряжения является такой, при котором он реагирует на напряжение прямой последовательности, так как режим работы генератора определяется в основном прямой последовательностью векторов фазовых магнитных потоков машины, а следовательно, и прямой последовательностью фазовых или линейных напряжений генератора. Как извест-

но, несимметричную систему токов, возникающих при неравномерной нагрузке, можно разложить на симметричные составляющие, причем только токи прямой последовательности создают результирующие ампервитки реакции якоря, неподвижные относительно вращающихся полюсов и, следовательно, определенным образом воздействующие на основное поле машины. Поэтому при реагировании на составляющую напряжения прямой последовательности обеспечивается правильное регулирование возбуждения трехфазного генератора при несимметричных нагрузках.

Несимметричные системы с точки зрения разложения их на симметричные составляющие могут быть разделены на две группы:

- а) системы, сумма векторов которых равна нулю;
- б) системы, сумма векторов которых не равна нулю.

Определять симметричные составляющие систем первой группы сравнительно просто. Системы второй группы обычно приводят к системам первой группы, используя для этой цели векторные разности.

Если имеется несимметричная система векторов $\dot{A}$, $\dot{B}$, $\dot{C}$, то векторы нулевой, прямой и обратной последовательности в первой фазе выражаются через систему векторов $\dot{A}$, $\dot{B}$, $\dot{C}$ следующим образом:

вектор нулевой последовательности

$$\dot{A}_0 = \frac{\dot{A} + \dot{B} + \dot{C}}{3}; \quad (10.5)$$

вектор прямой последовательности

$$\dot{A}_1 = \frac{\dot{A} + a\dot{B} + a^2\dot{C}}{3}; \quad (10.6)$$

вектор обратной последовательности

$$\dot{A}_2 = \frac{\dot{A} + a^2\dot{B} + a\dot{C}}{3}, \quad (10.7)$$

где $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ — оператор поворота вектора на 120° в сторону вращения.

Из выражения (10.5) следует, что если асимметричная система векторов образует замкнутый треугольник (т. е. система замкнутая), то нулевая последовательность обращается в нуль.

При условии

$$\dot{A} + \dot{B} + \dot{C} = 0 \quad (10.8)$$

определить симметричные составляющие можно путем использования только двух векторов несимметричной системы.

Векторы систем прямой и обратной последовательности находятся из уравнений (10.6) и (10.7) следующим образом:

$$\dot{A}_1 = \frac{1}{3} [(a-1)\dot{B} + (a^2-1)\dot{C}]; \quad (10.9)$$

$$\dot{A}_2 = \frac{1}{3} [(a^2-1)\dot{B} + (a-1)\dot{C}] \quad (10.10)$$

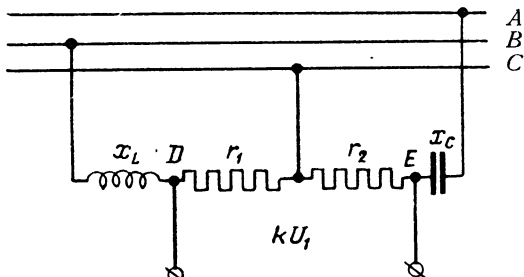
или

$$\dot{A}_1 = -\frac{1}{\sqrt{3}} [\dot{B}e^{-j30^\circ} + \dot{C}e^{j30^\circ}] = -\frac{e^{-j30^\circ}}{\sqrt{3}} [\dot{B} + \dot{C}e^{j60^\circ}]; \quad (10.11)$$

$$\dot{A}_2 = -\frac{1}{\sqrt{3}} [\dot{B}e^{j30^\circ} + \dot{C}e^{-j30^\circ}] = -\frac{e^{j30^\circ}}{\sqrt{3}} [\dot{B} + \dot{C}e^{-j60^\circ}]. \quad (10.12)$$

Система векторов фазовых напряжений генератора в ряде случаев может оказаться разомкнутой (не образовывать замкнутого треугольника напряжений); в такой системе напряжение нулевой последовательности не равно нулю.

Линейные напряжения трехфазной системы всегда образуют замкнутый треугольник и их целесообразно использовать для выделения напряжения прямой последовательности.

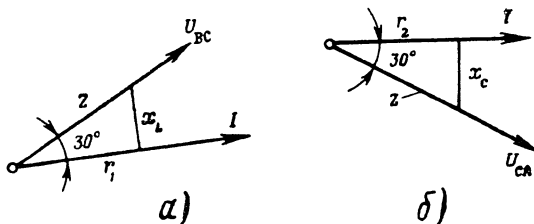


Фиг. 10.11. Принципиальная схема фильтра напряжения прямой последовательности.

Таким образом, для системы линейных напряжений $\dot{U}_{AB}$, $\dot{U}_{BC}$, $\dot{U}_{CA}$ напряжение прямой последовательности

$$\dot{U}_1 = -\frac{\dot{U}_{BC}e^{-j30^\circ} + \dot{U}_{CA}e^{j30^\circ}}{\sqrt{3}} = -\frac{e^{-j30^\circ}}{\sqrt{3}} [\dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA}e^{j60^\circ}]. \quad (10.13)$$

Анализ формулы (10.13) показывает, что для получения напряжения прямой последовательности необходимо сложить векторы, пропорциональные $\dot{U}_{BC}$ и $\dot{U}_{CA}$, повернув их соответственно на -30° и $+30^\circ$. Это выполняется посредством фильтров, одна из схем которых изображена на фиг. 10.11.



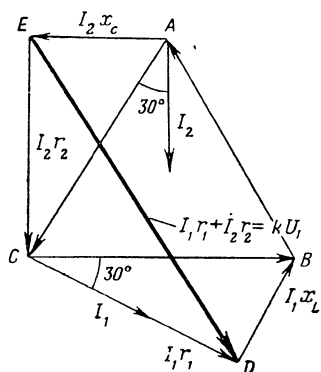
Фиг. 10.12. *a* — треугольник сопротивлений x_L и r_1 ; *б* — треугольник сопротивлений x_C и r_2 .

На фиг. 10.12, *a* изображен треугольник сопротивлений x_L и r_1 , а на фиг. 10.12, *б* — сопротивлений x_C и r_2 , входящих в схему фильтра.

Нетрудно убедиться, что если $x_L = \frac{\sqrt{3}}{3} r_1$, $x_C = \frac{\sqrt{3}}{3} r_2$ и $x_L = x_C$, то напряжение, снимаемое с сопротивлений r_1 и r_2 (см. фиг. 10.11), представляет собой величину, пропорциональную напряжению прямой последовательности.

На фиг. 10.13 изображена векторная диаграмма для этого фильтра. Однако приведенный выше фильтр прямой последовательности может быть использован лишь в том случае, если частота генератора поддерживается строго постоянной. При изменении частоты такой фильтр дает большие искажения. Например, если частота генератора увеличивается,

то сопротивление x_L возрастает, а сопротивление x_C уменьшается, что приводит к значительному отклонению напряжения, снимаемого с сопротивлений r_1 и r_2 , от величины, пропорциональной напряжению прямой последовательности. Фильтр прямой последовательности можно построить и иным образом, о чем наглядно свидетельствуют следующие модификации основной формулы, использованной для получения фильтра, изображенного на фиг. 10.11.



Фиг. 10.13. Векторная диаграмма напряжений для схемы фиг. 10.11.

$$\dot{U}_1 = -\frac{e^{j30^\circ}}{\sqrt{3}} [\dot{U}_{BC} e^{-j60^\circ} + \dot{U}_{CA}]; \quad (10.14)$$

$$\dot{U}_1 = -\frac{e^{-j30^\circ}}{\sqrt{3}} [\dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} e^{j60^\circ}]; \quad (10.15)$$

$$\dot{U}_1 = -\frac{e^{-j60^\circ}}{\sqrt{3}} [\dot{U}_{BC} e^{j30^\circ} + \dot{U}_{CA} e^{j90^\circ}]. \quad (10.16)$$

Множитель e^{-ja} , стоящий перед скобками, для регулятора существенной роли не играет, так как чувствительный орган регулятора реагирует на величину, пропорциональную эффективному значению напряжения прямой последовательности, а не на фазу. На фиг. 10.14, 10.15 и 10.16 изображены наиболее распространенные схемы фильтров прямой последовательности и соответствующие им векторные диаграммы.

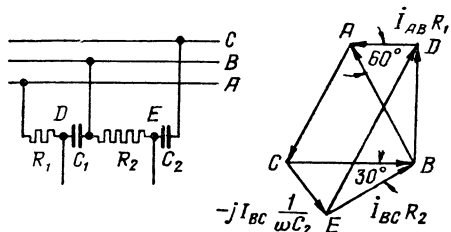
На фиг. 10.14 изображена схема фильтра напряжения прямой последовательности, состоящего из двух конденсаторов и двух сопротивлений.

Фильтр с реостатным делителем напряжения представлен на фиг. 10.15. Фильтр по схеме несколько проще, чем фильтр фиг. 10.14, так как состоит только из трех сопротивлений и одного конденсатора. Величина напряжения прямой последовательности на выходе фильтра, как показывает векторная диаграмма, несколько меньше, чем у фильтра фиг. 10.14. Делитель напряжения, состоящий из двух одинаковых сопротивлений R_2 , можно заменить любым иным делителем, составленным из двух одинаковых по величине реактивных или смешанных сопротивлений.

На фиг. 10.16 приведена схема фильтра, предложенного Я. М. Смодинским. Напряжение прямой последовательности на выходе фильтра, как видно из векторной диаграммы, больше, чем на выходе фильтра, изображенного на фиг. 10.14.

Поскольку номинальное линейное напряжение самолетной сети переменного тока равно 200 в, то отпадает необходимость применения понижающих трансформаторов напряжения, употребляемых обычно для наземных электрических систем. Отказ от применения трансформаторов также целесообразен с точки зрения температурной компенсации, имеющей существенное значение для самолетных условий.

В тех случаях, когда необходимо, чтобы схема фильтра не была свя-



Фиг. 10.14. Фильтр напряжения прямой последовательности, состоящий из двух конденсаторов и двух сопротивлений.

зана электрически непосредственно с цепью генератора, применяют трансформаторное включение фильтров прямой последовательности.

Ту или иную схему фильтра напряжения прямой последовательности для целей регулирования напряжения выбирают на основе оценки следующих свойств:

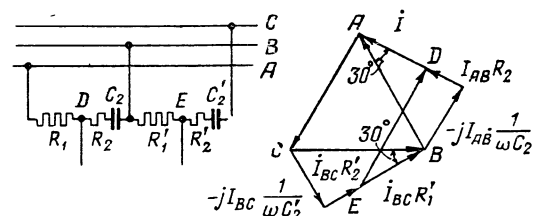
1) простоты схемы и веса;

2) мощности, потребляемой устройством;

3) простоты стабилизации и разделения реактивных нагрузок при параллельной работе;

4) погрешностей, вносимых фильтром при изменении частоты переменного тока генератора.

Отклонения частоты генератора от номинальной вызывают изменение реактивных сопротивлений, входящих в фильтр, благодаря чему нарушаются соотношения между его элементами. Это вызывает определенную погрешность при регулировании напряжения.



Фиг. 10.15. Фильтр напряжения прямой последовательности с реостатным делителем напряжения.

Вторым источником погрешностей при регулировании напряжения в случае применения однофазных регуляторов напряжения, включаемых через фильтры напряжения прямой последовательности, является изменение окружающей температуры в широких пределах: от -60 до $+50^\circ\text{C}$.

Фиг. 10.16. Фильтр напряжения прямой последовательности Смородинского.

Изменение температуры вызывает изменение сопротивлений, входящих в состав фильтра, а также сопротивления обмотки регулятора и сопротивления выпрямителя.

Расчеты показывают, что погрешности, вызванные отклонениями частоты на 5%, значительно превосходят погрешности, вызываемые изменением температуры в пределах $-60 \div +50^\circ\text{C}$.

§ 10.4. СТАБИЛИЗАЦИЯ СООТНОШЕНИЯ РЕАКТИВНЫХ НАГРУЗОК ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ГЕНЕРАТОРОВ НА ОБЩИЕ ШИНЫ

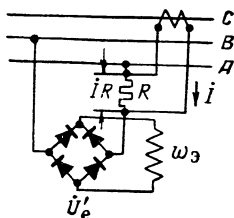
При параллельной работе генераторов, снабженных астатическими регуляторами напряжения, возникает необходимость в специальных устройствах, обеспечивающих устойчивое и равномерное распределение реактивной нагрузки между генераторами.

При отсутствии этих устройств регуляторы напряжения приходят в действие при отклонениях напряжения вследствие изменения нагрузки и изменяют возбуждение генераторов до тех пор, пока напряжение на шинах не восстановится. Так как скорость действия регуляторов практически не может быть совершенно одинаковой, то часть генераторов при этом перевозбуждается, а часть — недо возбуждается. В результате этого распределение реактивной нагрузки между генераторами становится неустойчивым, коэффициенты мощности колеблются. Помимо дополнительных потерь, возникает опасность недопустимой перегрузки генераторов реактивным током.

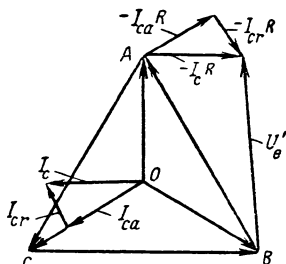
Для устойчивого распределения реактивных нагрузок между генераторами, снабженными астатическими регуляторами и работающими на общие шины, применяются два способа: токовая стабилизация с индивидуальными токовыми компенсаторами и дифференциальная токовая стабилизация по схеме многоугольника.

Токовой компенсацией называется воздействие на чувствительный элемент регулятора напряжения посредством тока нагрузки генератора. Устройство, при помощи которого такое воздействие осуществляется, называется компенсатором.

Токовую компенсацию применяют в тех случаях, когда возбуждение генератора необходимо регулировать не только в зависимости от величины напряжения, но и в зависимости от величины и фазы тока нагрузки.



Фиг. 10.17. Схема включения токового компенсатора.



Фиг. 10.18. Векторная диаграмма напряжений токового компенсатора.

Токовую компенсацию можно осуществить так, как показано на фиг. 10.17.

На сопротивлении R , включенном последовательно в цепь обмотки регулятора, при помощи трансформатора тока создается падение напряжения, пропорциональное току нагрузки.

Для простоты на схеме показано, что обмотка регулятора ω_3 включена не через фильтр напряжения прямой последовательности, а непосредственно на линейное напряжение генератора. Предполагается также, что кажущееся сопротивление цепи этой обмотки мало отличается от активного.

Для правильной работы компенсатора приходится учитывать необходимость компенсации падения напряжения, вызванного главным образом реактивным сопротивлением машины.

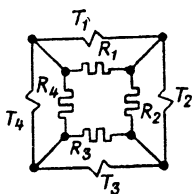
Векторная диаграмма, представленная на фиг. 10.18, показывает, что при включении трансформатора тока в свободную фазу падение напряжения на сопротивлении от активной составляющей тока нагрузки в этом случае очень мало влияет на величину напряжения $\dot{U}'_e$, приложенного к обмотке регулятора, тогда как падение напряжения от реактивной составляющей совпадает по направлению с линейным напряжением $\dot{U}_{AB}$ и складывается с ним алгебраически.

Таким образом, наиболее просто стабилизацию распределения реактивных нагрузок при параллельной работе можно осуществить в том случае, когда направление реактивной составляющей тока одной из фаз генератора составляет угол в 0 или 180° с направлением напряжения $\dot{U}_\phi$ на выходе нагруженного фильтра прямой последовательности. При этом в схеме потребуются только дополнительное сопротивление и трансформатор тока. Если же приведенное выше условие не соблюдается, то для получения необходимого сдвига фаз в цепь трансформатора тока следует вводить дроссель или конденсатор. При этом исключается возможность плавного регулирования схемы стабилизации.

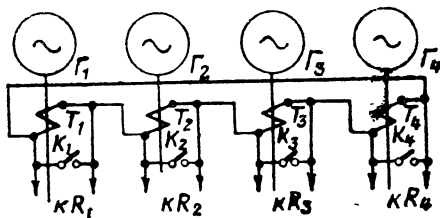
Для устойчивого распределения реактивных нагрузок необходимо, чтобы увеличение индуктивной нагрузки генератора сопровождалось снижением напряжения на его зажимах.

Обычно компенсаторы рассчитываются так, что напряжение генератора может быть снижено на 10% при 100%-ной индуктивной нагрузке. Практически достаточно иметь понижение напряжения на 2—5% при индуктивной нагрузке, равной номинальной, чтобы расхождение реактивных нагрузок не превышало 10% от номинальной. Значительное изменение напряжения при использовании индивидуальной токовой компенсации препятствует ее применению в самолетных системах энергоснабжения. Наибольшее применение на самолетах находит дифференциальная токовая стабилизация.

В схеме дифференциальной токовой стабилизации, изображенной на фиг. 10.19, вторичные обмотки трансформаторов тока соединяются в



Фиг. 10.19. Схема дифференциальной токовой компенсации.



Фиг. 10.20. Принципиальная схема включения токовых компенсаторов.

многоугольники. Сопротивления R , изображенные на этой схеме, включены каждое последовательно в цепь питания обмотки соответствующего регулятора напряжения, подобно тому, как включено сопротивление R в схеме индивидуальной токовой стабилизации (см. фиг. 10.17).

Если все генераторы в одинаковой степени нагружены реактивным током, то падения напряжения на сопротивлениях многоугольника от реактивных составляющих тока нагрузки не возникает и отсутствует воздействие тока нагрузки на напряжение, приложенное к обмоткам регуляторов.

Если реактивная составляющая тока одного из генераторов становится больше, чем остальных, то на сопротивлениях многоугольника возникают падения напряжения, вызванные протеканием разности реактивных составляющих токов. При этом наибольшим оказывается падение напряжения на сопротивлении того генератора, реактивный ток которого превысил реактивные токи других генераторов. Это падение напряжения складывается с напряжением, питающим обмотку регулятора напряжения. Повышение напряжения на обмотке регулятора вызывает уменьшение тока возбуждения данного генератора, а следовательно, и снижение его реактивного тока. Падение напряжения на сопротивлениях остальных генераторов соответственно меньше, так как реактивная составляющая разности токов делится между сопротивлениями обратно пропорционально их величине. Эти падения напряжения вызывают некоторое увеличение тока возбуждения остальных генераторов. Таким образом, достигается выравнивание реактивных нагрузок между генераторами, причем напряжение на шинах остается неизменным.

Если какой-нибудь из генераторов отключается от общих шин, то его трансформатор тока шунтируется блокконтактами соответствующего сетевого контактора, как это видно на фиг. 10.20.

На фиг. 10.21 отдельно изображена схема соединения вторичных цепей трансформаторов тока в случае n параллельно работающих генераторов. Для схемы, изображенной на фиг. 10.21, можно написать

$$i_{R1}R_1 + i_{R2}R_2 + \dots + i_{Rn}R_n = 0. \quad (10.17)$$

Так как $R_1=R_2=\dots=R_n=R$, то можно написать

$$i_{R1} + i_{R2} + \dots + i_{Rn} = 0. \quad (10.18)$$

Учитывая, что (фиг. 10.21)

$$i_{R1} = \frac{I_1}{k} - i; \quad i_{R2} = \frac{I_2}{k} - i; \quad \dots \quad i_{Rn} = \frac{I_n}{k} - i, \quad (10.19)$$

где k — коэффициент трансформации трансформаторов тока;

i — ток в соединительном проводе,

I_i — ток нагрузки,

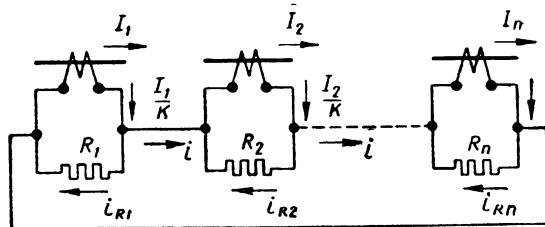
из (10.18) можно получить

$$ki = \frac{I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n}{n} = I_{cp}, \quad (10.20)$$

где I_{cp} — средняя арифметическая величина токов нагрузки.

Отсюда

$$i = \frac{I_{cp}}{k}. \quad (10.21)$$



Фиг. 10.21. Схема соединения вторичных цепей трансформаторов тока для n параллельно работающих генераторов.

Подставляя в (10.19), получают

$$i_{R1} = \frac{I_1}{k} - \frac{I_{cp}}{k} = \frac{I_1 - I_{cp}}{k};$$

$$\dots$$

$$i_{Ri} = \frac{I_i - I_{cp}}{k}.$$

Таким образом, ток, протекающий через уравнивающее сопротивление i -той цепи, пропорционален отклонению тока нагрузки i -того генератора от среднего значения токов нагрузки всех генераторов.

Выше было установлено, что подключение уравнивающего сопротивления по схеме фиг. 10.17 дает возможность подавать на регулятор напряжения корректирующий сигнал, пропорциональный реактивной нагрузке. Величина корректирующего действия тока i_{Ri} на i -тый регулятор напряжения пропорциональна отклонению реактивной нагрузки i -того генератора от средней реактивной нагрузки всех генераторов.

Большой интерес представляет поведение системы при неисправностях в цепях регулятора напряжения, возбуждения и уравнивательной цепи,

приводящие к перевозбуждению или недовозбуждению одного из генераторов.

Перевозбуждение одного из параллельно работающих генераторов (вследствие неисправностей или неправильной первоначальной установки регулятора напряжения) приводит к перегрузке неисправного генератора реактивным током. Уравнительная цепь в этом случае стремится выравнять реактивную нагрузку генераторов, что приводит к росту напряжения на остальных генераторах (напряжение на поврежденном генераторе снизиться не может вследствие неисправности в его цепи возбуждения).

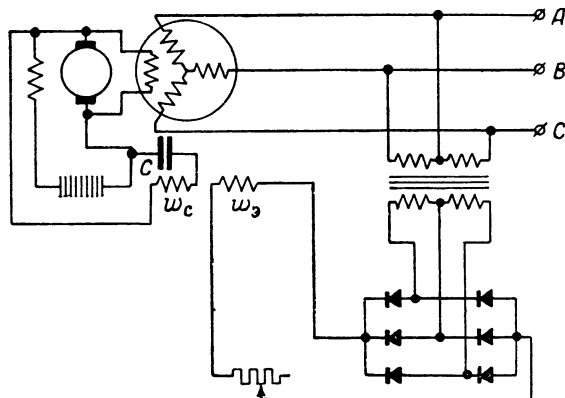
В результате в системе может установиться значительное перенапряжение, причем неисправный генератор будет перевозбужден, а исправные — недовозбуждены. При значительной нагрузке в сети снижение возбуждения исправных генераторов может привести к выпадению их из синхронизма вследствие большого снижения их синхронизирующих моментов.

Недовозбуждение одного из параллельно работающих генераторов (вследствие неисправностей или неправильной первоначальной установки регулятора напряжения) приводит к разгрузке неисправного генератора от реактивного тока. В этом случае уравнительная цепь, стремясь выравнять реактивную нагрузку, уменьшает напряжение на исправных генераторах. В результате этого в сети установится пониженное напряжение, причем неисправный генератор оказывается недовозбужденным. Большое снижение синхронизирующего момента неисправного генератора (при наличии значительной нагрузки в сети) может привести к выпадению его из синхронизма.

§ 10. 5. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПЯЖЕНИЯ САМОЛЕТНЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Регулирование напряжения самолетных генераторов переменного тока осуществляется в настоящее время в большинстве случаев с помощью электромеханических регуляторов напряжения: угольных и вибрационных или с помощью регуляторов с магнитными усилителями.

В отдельных случаях используются электронные регуляторы или схемы, в которых автоматическое регулирование напряжения синхронных генераторов осуществляется путем введения в цепь возбуждения дополнительной энергии от трансформаторов тока и напряжения, установленных на генераторе, а не изменением сопротивления цепей возбуждения.



Фиг. 10. 22. Схема включения угольного регулятора напряжения, предназначенного для автоматического регулирования напряжения самолетных генераторов переменного тока.

а) Регулирование напряжения с помощью угольного регулятора. Принципиальная схема включения угольного регулятора напряжения, предназначенного для автоматического регулирования напряжения самолетного генератора переменного тока, изображена на фиг. 10. 22. Питание обмотки электромагнита осуществляется

через трехфазный трансформатор и выпрямитель, собранный по схеме А. Н. Ларионова. Последовательно с обмоткой электромагнита включен реостат, предназначенный для настройки регулятора.

Для увеличения устойчивости в регуляторе применяется стабилизирующий контур, состоящий из конденсатора C и дополнительной обмотки ω_c , расположенной на сердечнике электромагнита, с помощью которого осуществляется гибкая обратная связь.

В ряде случаев, как было уже указано, обмотка электромагнита регулятора включается через фильтр прямой последовательности и выпрямитель.

При отсутствии возбудителя, т. е. в случае возбуждения генератора от постороннего источника тока, в частности, от бортовой сети постоянного тока, угольные регуляторы напряжения включаются по схеме, изображенной на фиг. 10.23

Фиг. 10.23. Схема включения угольного регулятора напряжения для генератора с возбуждением от бортовой сети.

б) Вибрационные регуляторы напряжения. Принципиальная схема включения автоматических регуляторов напряжения вибрационного типа представлена на фиг. 10.24.

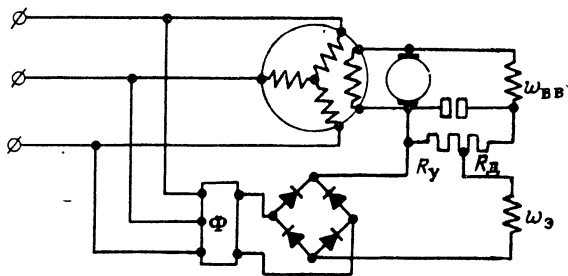
Питание обмотки электромагнита регулятора в большинстве случаев производится или через трехфазную схему выпрямления или через фильтр прямой последовательности и двухполупериодный выпрямитель. Для увеличения частоты пульсаций, т. е., следовательно, для уменьшения амплитуды пульсаций, вибрационный регулятор работает с так называемым ускоряющим сопротивлением.

Приведенной схеме с вибрационным регулятором свойственны все преимущества и недостатки вибрационного способа регулирования напряжения, подробно рассмотренные в гл. VI.

в) Регулирование напряжения синхронных генераторов с помощью магнитных усилителей. Регулирование напряжения синхронных генераторов может быть осуществлено с помощью магнитных усилителей. На фиг. 10.25 приведена принципиальная схема регулятора, применяемого для синхронных генераторов средней мощности.

На схеме обозначено G — генератор, B — возбудитель, ω_b — обмотка возбуждения генератора, $\omega_{b.b}$ — обмотка возбуждения возбудителя, TT — трансформатор тока, TN — трансформатор напряжения.

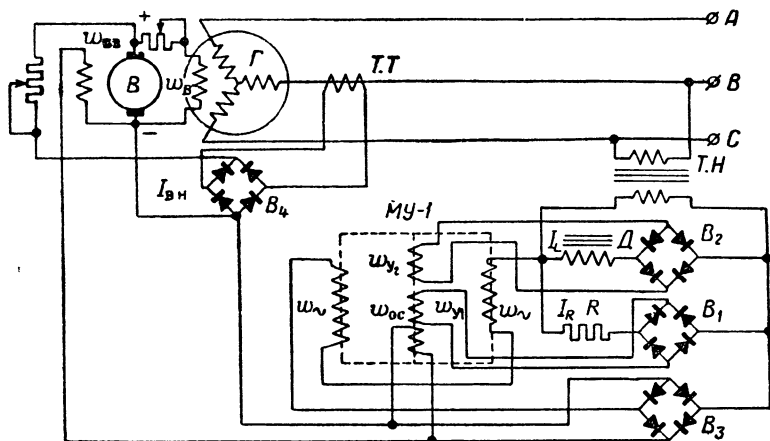
Регулятор состоит из дроссельного магнитного усилителя МУ-1 с обратной связью ($\omega_{o.c.}$) с двумя одинаковыми управляющими обмотками ω_{y1} и ω_{y2} .



Фиг. 10.24. Схема включения автоматического регулятора напряжения вибрационного типа

При напряжении генератора, равном номинальному, через эти обмотки протекают одинаковые токи, которые создают встречные подмагничивающие поля.

При повышении напряжения генератора ток I_L в насыщенном дросселе D растет быстрее, чем ток I_R в сопротивлении R , и в магнитной цепи усилителя появляется управляющая м. д. с., пропорциональная разности токов $I_L - I_R$. Эта м. д. с. создает подмагничивающее поле, направленное навстречу полю обмотки обратной связи, вследствие чего ток на выходе усилителя и, следовательно, ток возбуждения генератора уменьшаются. В рассматриваемой схеме осуществлена компаундировка генератора при помощи трансформатора тока, который посылает в обмотку



Фиг. 10.25. Принципиальная схема регулятора напряжения с магнитным усилителем.

возбуждения генератора дополнительный ток возбуждения $I_{вн}$, пропорциональный току нагрузки генератора.

В. Л. Иносовым и Л. В. Цукерником предложена схема возбуждения синхронного генератора, сочетающая компаундирование возбудителя от тока статора с электромагнитным регулятором напряжения, в котором применены насыщенный трансформатор в качестве нелинейного элемента измерительного органа и магнитный усилитель для усиления воздействия на цепи возбуждения. Схема не содержит разрывных контактов и движущихся частей и является весьма надежной и удобной в эксплуатации.

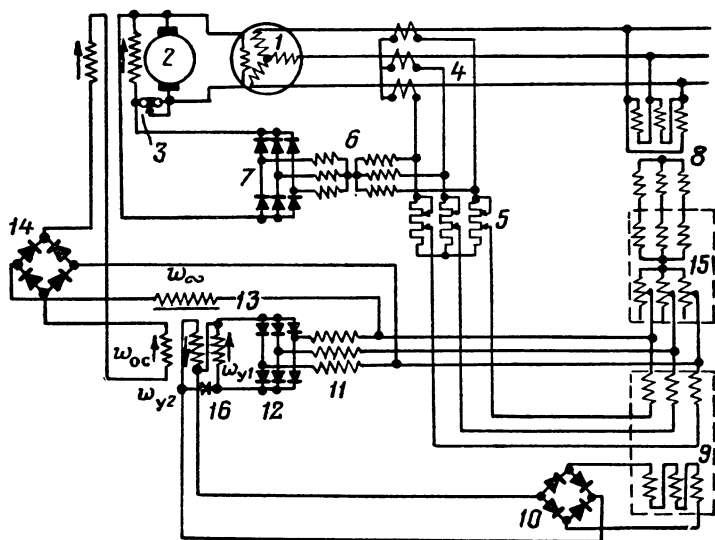
Принципиальная схема компаундирования синхронного генератора с электромагнитным регулятором напряжения В. Л. Иносова и Л. В. Цукерника изображена на фиг. 10.26.

Схема компаундирования содержит трансформаторы тока 4, регулируемое установочное сопротивление 5, выпрямительный трансформатор 6 и твердые выпрямители 7. Компаундирование включается на параллельную обмотку возбуждения возбудителя 2 или на отдельную обмотку возбуждения возбудителя.

Схема автоматического регулятора напряжения содержит нелинейный элемент измерительного органа регулятора 9, который присоединяется к трансформатору напряжения 8, линейный элемент регулятора — источник компенсирующего напряжения, представляющий собой трехфазный ненасыщенный дроссель 11 и твердый выпрямитель 12, также питающийся от трансформатора напряжения 8. Магнитный усилитель

регулятора 13 регулирует ток подпитки возбуждения возбудителя, поступающий от трансформатора напряжения 8 через обмотки переменного тока $\omega_{\sim}$ магнитного усилителя и через выпрямитель 14. Магнитный усилитель управляется результирующими подмагничивающими ампервитками от выпрямленных токов, поступающих в обмотки управления ω_{y1} , ω_{y2} и обмотки положительной обратной связи $\omega_{o.c.}$ Обмотка управления ω_{y1} питается через выпрямитель и дроссель 11 от трансформатора 8, обмотка управления ω_{y2} — от нелинейного элемента 9, причем м. д. с. этих обмоток направлены противоположно друг другу.

Положительная обратная связь создается обмоткой управления $\omega_{o.c.}$, включенной последовательно в цепь подпитки возбуждения возбудителя.



Фиг. 10. 26. Принципиальная схема компаундирования синхронного генератора с электромагнитным корректором напряжения при согласованном включении корректора.

1—генератор, 2—возбудитель, 3—шунтовый реостат, 4—трансформаторы тока, 5—установочное сопротивление, 6—выпрямительный трансформатор компаундирования, 7, 10, 12 и 14—твердые выпрямители, 8—трансформатор напряжения, 9—насыщенный трансформатор, 11—ненасыщенный дроссель, 13—магнитный усилитель, 15—установочный трансформатор, 16—блокирующий вентиль.

М. д. с. обмотки $\omega_{o.c.}$ направлена или согласованно с м. д. с. линейного элемента регулятора или противоположно ей, в зависимости от того, осуществляется ли соответственно согласованное включение или противовключение подпитки от регулятора по отношению к основному возбуждению возбудителя.

Настройка регулятора напряжения осуществляется установочным трансформатором 15 путем изменения величины напряжения, подводимого к регулятору.

Принцип действия регулятора напряжения заключается в следующем.

Чувствительный элемент 9 регулятора состоит из трех однофазных насыщенных трансформаторов, первичные обмотки которых соединены в звезду, а вторичные — в треугольник. В цепь треугольника включен селеновый выпрямитель 10. При небольших несимметриях чувствительный элемент реагирует на напряжение прямой последовательности.

Мощность на выходе чувствительного элемента регулятора недостаточна, чтобы непосредственно оказать нужное воздействие на возбуждение возбудителя. Поэтому между измерительным органом и цепями возбуждения вводится магнитный усилитель, который усиливает энергию регулирования и одновременно в случае необходимости меняет знак регулирующего воздействия.

Обмотка управления магнитного усилителя разбивается на две части. Одна питается через выпрямитель нелинейного элемента измерительного органа, другая — через выпрямитель 12, ненасыщенный дроссель 11 и трансформатор напряжения 8 генератора.

Если при номинальном напряжении м. д. с. обеих обмоток управления компенсируются, то при понижении или увеличении напряжения компенсация нарушается и выходной ток магнитного усилителя соответственно возрастает или уменьшается, а следовательно, возрастает или уменьшается ток возбуждения возбудителя.

Для того чтобы увеличение выходного тока магнитного усилителя происходило более резко, применяют положительную обратную связь в виде дополнительного подмагничивания от третьей обмотки, обтекаемой током выхода магнитного усилителя.

Блокирующий клапан 16 уравнивает токи в обмотках ω_{y1} и ω_{y2} магнитного усилителя, если ток нелинейного элемента больше тока линейного элемента, и тем исправляет характеристику регулятора в зоне повышенных напряжений.

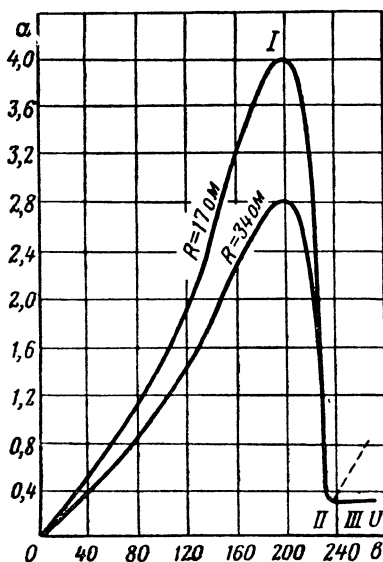
Характеристика регулятора — зависимость тока выхода магнитного усилителя от напряжения генератора — представлена на фиг. 10.27 (пунктир соответствует тому случаю, когда блокирующий клапан 16 отсутствует).

Рабочей частью характеристики является участок I—II. Крутизной характеристики на этом участке определяется статизм регулирования, максимальный и минимальный токи и пределы автоматического регулирования напряжения.

Компаундирование током нагрузки осуществляется обычным путем.

В ненормальных режимах работы генератора при переходе на нерабочие участки характеристики корректора O—I и II—III, соответствующие как сильно пониженному, так и повышенному напряжению, компаундирование облегчает условия устойчивости работы регулятора, так как компаундирующий ток во всех случаях противодействует изменению напряжения на зажимах генератора, которые могут происходить вследствие изменения нагрузки.

Экспериментальными исследованиями В. Л. Иносова и Л. В. Цукерника на синхронных генераторах мощностью от 6 до 35 квт было установлено, что в предлагаемой ими схеме статизм регулирования в пределах от холостого хода до номинального тока машины составляет 2—3%.

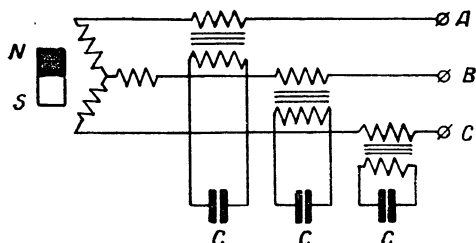


Фиг. 10.27. Характеристика корректора при согласованном включении (R — нагрузка на выходе).

§ 10.6. СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПЯЖЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Синхронные генераторы с постоянными магнитами обладают большим недостатком: они имеют резко падающую внешнюю характеристику, особенно при реактивной нагрузке. Это обстоятельство затрудняет их применение в тех случаях, когда требуется постоянство напряжения при колебаниях нагрузки. Так как в машинах с постоянными магнитами поток возбуждения не регулируется, то применение в них обычных регуляторов напряжения не представляется возможным, и приходится прибегать к специальным мероприятиям.

В ряде случаев в генераторах с электромагнитным возбуждением в силу тех или иных причин ток возбуждения не регулируется, и поэтому



Фиг. 10. 28. Последовательный стабилизатор напряжения машины с возбуждением от постоянных магнитов.

для таких случаев также можно использовать описываемые ниже мероприятия для поддержания напряжения генераторов переменного тока в заданных пределах при изменениях нагрузки во внешней цепи.

С. В. Краузом, Б. Д. Садовским и Т. Г. Сорокером еще в 1939 г. были разработаны два типа стабилизаторов для синхронных машин с постоянными магнитами мощностью порядка до нескольких киловатт, которые

представляют собой неотъемлемую часть генератора, и их параметры целиком определяются параметрами и характеристиками данного генератора.

Принцип действия стабилизатора первого типа основан на компенсации полного реактанса генератора (последовательно включаемый стабилизатор); второго типа — на автоматическом введении в генератор реактивного тока того или иного знака при изменении нагрузки (параллельно присоединяемый стабилизатор).

а) Последовательно включаемый стабилизатор. На фиг. 10. 28 показана схема последовательного включения стабилизатора напряжения машины с постоянными магнитами. Стабилизатор представляет собой емкость, включенную последовательно с нагрузочной цепью генератора через повышающий трансформатор с ненасыщенной магнитной системой.

Включение емкости через повышающий трансформатор сделано с целью уменьшения емкости конденсаторов.

С целью устранения резонансных явлений и во избежание нарушения стабилизации при коротких замыканиях, а также при включении в сеть потребителей, обладающих большой индуктивностью (трансформаторов, асинхронных двигателей и т. п.), рекомендуется параллельно к конденсаторам присоединять высокоомные сопротивления.

Напряжение в обмотке якоря генератора падает в основном за счет реакции якоря и потоков рассеяния, т. е. за счет реактанса короткого замыкания x_{κ} . Реактанс этот носит индуктивный характер:

$$x_{\kappa} = \omega L_{\kappa},$$

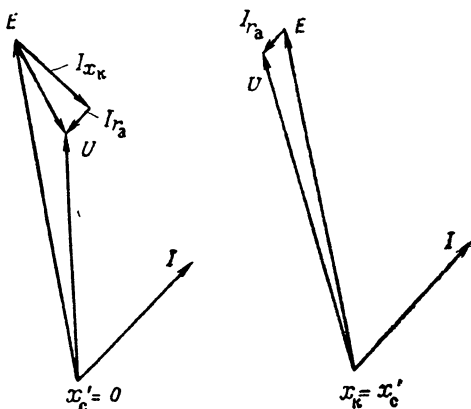
где L_{κ} — индуктивность короткого замыкания.

Благодаря включению последовательно в цепь якоря генератора емкости общее реактивное падение напряжения в цепи якоря может быть сведено к нулю, так как при соответствующем выборе емкостей

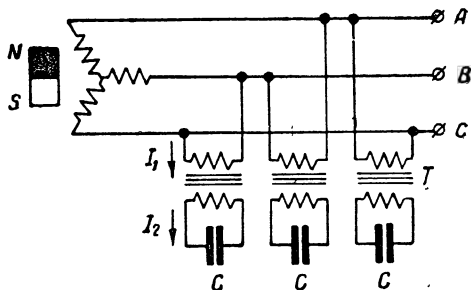
$$\omega L_k - \frac{1}{\omega C'} = 0,$$

где C' — емкость, приведенная к цепи якоря.

Как видно из векторной диаграммы, изображенной на фиг. 10.29, при $x_k = x'_c$ $U \approx E$. Последовательный стабилизатор позволяет при изменении нагрузки от нуля до номинальной при $\cos \varphi = 0,9$ и ниже поддерживать напряжение в пределах точности до 1—2% и при $\cos \varphi = 1$ с точностью до 3—5%, в то время как без стабилизатора падение напряжения у генераторов с постоянными магнитами при номинальной нагрузке составляет 20—40% от напряжения холостого хода.



Фиг. 10.29. Векторная диаграмма последовательного стабилизатора напряжения.



Фиг. 10.30. Параллельный стабилизатор напряжения машины с возбуждением от постоянных магнитов.

Преимуществом этого способа стабилизации напряжения является его простота; к недостаткам его следует отнести необходимость использования конденсаторов большой мощности и на большое напряжение, что сильно удорожает схему.

Описанным способом можно поддерживать напряжение постоянным даже в месте потребления энергии. Для этого необходимо брать $x_c < x_k$.

б) Параллельно включаемый стабилизатор. Принципиальная схема параллельно включаемого стабилизатора, изображенная на фиг. 10.30, состоит из насыщенных трансформаторов (T), первичные цепи которых присоединены к зажимам генератора параллельно нагрузке, а вторичные — к емкостям C .

Емкость и индуктивность трансформатора подбираются так, чтобы при номинальном напряжении машины в цепи стабилизатора наступал резонанс токов. Трансформаторы должны быть рассчитаны таким образом, чтобы при нормальных диапазонах изменения напряжения на шинах генератора они были в насыщенном или перенасыщенном состоянии.

На фиг. 10.31 приведена зависимость намагничивающего тока трансформатора от напряжения на первичной обмотке трансформатора, где по оси абсцисс отложен намагничивающий ток трансформатора, а по оси ординат — напряжение на первичной обмотке трансформатора.

Намагничивающий ток трансформатора $\dot{I}_0$ является геометрической суммой первичного и приведенного к первичной цепи вторичного тока трансформатора:

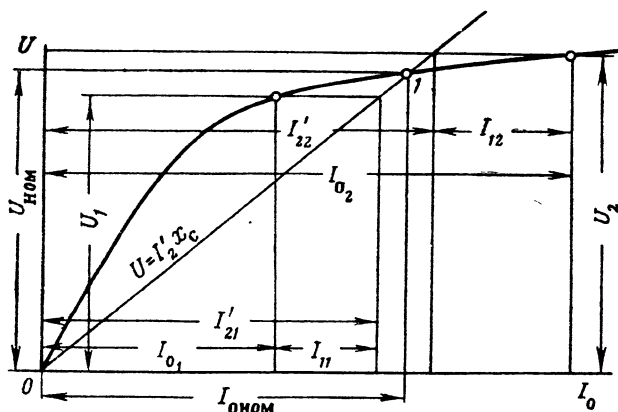
$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2',$$

где $\dot{I}_0$ — намагничивающий ток трансформатора;

$\dot{I}_1$ — первичный ток трансформатора;

$\dot{I}_2' = \frac{\omega_2}{\omega_1} \dot{I}_2$ — приведенный к первичной цепи вторичный ток трансформатора;

ω_1 и ω_2 — числа витков первичной и вторичной обмоток трансформатора.



Фиг. 10.31. Зависимость намагничивающего тока трансформатора от напряжения на его первичной обмотке.

При нормальной работе, соответствующей точке I на фиг. 10.31, величина намагничивающего тока трансформатора равна $\dot{I}_{0\text{ном}}$, трансформатор находится в перенасыщенном состоянии.

Емкостный ток во вторичной цепи трансформатора находится в линейной зависимости от приложенного напряжения (если пренебречь незначительными активными сопротивлениями):

$$\dot{U}_C = \dot{I}_C x_2 = \dot{I}_2 x_C,$$

где $\dot{U}_C$ — напряжение на вторичной обмотке трансформатора;

$\dot{I}_C$ — ток во вторичной цепи трансформатора;

x_C — реактанс во вторичной цепи трансформатора.

На фиг. 10.31 зависимость тока во вторичной цепи $\dot{I}_C' = \dot{I}_2'$, приведенного к первичной цепи, от напряжения на первичной обмотке трансформатора может быть изображена в виде прямой, проходящей через начало координат и точку I , соответствующую номинальному режиму работы трансформатора.

Если пренебречь активными сопротивлениями, то в номинальном режиме первичный ток трансформатора равен нулю:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2' = 0.$$

Когда напряжение на зажимах генератора, а следовательно, и на первичной обмотке трансформаторов уменьшится или увеличится, в первичных цепях трансформаторов T будут протекать опережающие или

Падение напряжения получается в основном за счет увеличения реактивного падения напряжения $\dot{I}x_{\text{ж}}$, создаваемого реактивным током $I \sin \varphi$.

Трансформатор создает в этом случае дополнительную реактивную нагрузку, т. е. опережающий ток $\dot{I}_{11}$ (см. фиг. 10.32). Нетрудно убедиться, что этот опережающий ток компенсирует реактивное падение напряжения (пунктир на фиг. 10.32), благодаря чему напряжение поддерживается постоянным.

Повышение напряжения происходит в основном за счет опережающего реактивного тока (см. фиг. 10.33). Первичный ток трансформаторов I_{12} является в этом случае отстающим (фиг. 10.33) и уменьшает падение напряжения (пунктирные линии, фиг. 10.33), благодаря чему напряжение поддерживается постоянным.

Наиболее точная стабилизация напряжения с помощью параллельного стабилизатора получается при нагрузках с $\cos \varphi$, близким к единице. Точность стабилизации при $\cos \varphi = 0,7 \div 0,5$ равна 2,5%.

Следует отметить, что описанные выше способы стабилизации просты и надежны вследствие того, что не имеют ни вращающихся, ни подвижных частей и представляют собой чисто статические аппараты, которые могут выполняться как для многофазных, так и для однофазных систем.

Глава XI

ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА САМОЛЕТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 11.1. УСЛОВИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Под параллельной работой генераторов переменного тока понимается совместная работа нескольких генераторов, одноименные зажимы которых соединяются между собой непосредственно или через относительно небольшие индуктивные сопротивления.

Работа такой системы протекает нормально только в случае равенства частот э. д. с. всех источников тока; в противном случае токи разных частот, накладываясь друг на друга, вызывают биения тока, мощности и напряжения, делающие совместную работу невозможной.

Для включения синхронных генераторов на параллельную работу необходимо соблюдение четырех условий:

1. Электродвижущая сила подключаемого генератора должна быть равна по величине напряжению сети.

2. Фаза э. д. с. генератора должна совпадать с фазой напряжения сети.

3. Частота генератора в момент включения на параллельную работу должна быть практически равна частоте сети.

4. Порядок следования фаз в соединяемых точках должен быть одинаковым.

Для устойчивой параллельной работы нескольких синхронных генераторов на общую сеть необходимо выполнить еще ряд условий, без соблюдения которых совместная работа их получилась бы неудовлетворительной.

1. Для получения устойчивой работы, т. е. для того, чтобы синхронные генераторы не выпадали из синхронизма, необходимо, чтобы каждый из агрегатов обладал равномерным вращением и чтобы синхронизирующая мощность, которую может развить каждый из генераторов, была достаточно велика.

В нормальных машинах синхронизирующие мощности обычно в 2—3 раза превосходят номинальные мощности машин, что более чем достаточно для обеспечения устойчивой работы при всех практически возможных условиях работы генераторов, приводимых во вращение двигателями или от специальных приводов постоянной скорости, мощность которых соизмерима с мощностью генераторов.

Что же касается неравномерности вращения генераторов, имеющей место во всех случаях, когда в качестве двигателей для вращения генераторов применяются двигатели внутреннего сгорания или газовые турбины (индивидуальные агрегаты), то степени неравномерности хода,

которые обычно допускаются исходя из необходимости определенного ограничения колебаний генератора при работе его в одиночку, оказываются почти всегда приемлемыми и при параллельной работе.

Синхронизирующие мощности генераторов, вообще говоря, оказываются всегда достаточными для того, чтобы удерживать генераторы в синхронизме, несмотря на имеющуюся неравномерность их вращения.

2. Для того чтобы параллельная работа протекала правильно, нужно, очевидно, чтобы все генераторы одинаково реагировали на все изменения режима сети.

Если нагрузка в сети изменяется (увеличивается или уменьшается), то мощности, отдаваемые всеми генераторами в сеть, должны также соответственно измениться. При неправильном реагировании генераторов на изменения нагрузки могут получаться перегрузки одних машин, в то время как остальные могут оставаться недогруженными.

Условие правильного распределения нагрузок между совместно работающими генераторами выполняется в тех случаях, когда при одинаковых мощностях генераторов все агрегаты являются идентичными, а при различных мощностях агрегаты обладают подобными (одинаковыми в относительных единицах) характеристиками.

Под подобными агрегатами в данном случае понимаются такие, в которых генераторы обладают подобными характеристиками, а механические двигатели или приводы постоянной скорости должны быть снабжены регуляторами, имеющими одинаковые чувствительности и характеристики. При таком условии все изменения нагрузки в сети будут равномерно распределяться между совместно работающими генераторами так, что перегрузки отдельных машин не получается.

3. Указанные в п. 1 условия получения устойчивой работы являются достаточными в тех случаях, когда агрегаты вращаются с постоянной угловой скоростью.

При агрегатах с двигателями соизмеримой мощности или приводами постоянной скорости для получения устойчивой работы необходимо еще принимать меры к тому, чтобы не могли возникнуть качания генераторов; которые при некоторых условиях могут достигать таких размеров, что совместная работа окажется невозможной.

4. Параллельная работа может считаться удовлетворительной лишь тогда, когда при всех режимах работы машин не может возникать между генераторами таких уравнивающих токов, которые ухудшают устойчивость работы машин и вызывают добавочные потери в генераторах, уменьшая к. п. д. и увеличивая нагревание обмоток.

Для соблюдения этого условия необходимо, чтобы кривые э. д. с. генераторов были одинаковы и синусоидальны. В противном случае между генераторами протекают токи высших частот.

§ 11.2. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ДВУХ ГЕНЕРАТОРОВ, ВРАЩАЮЩИХСЯ С ПОСТОЯННЫМИ УГЛОВЫМИ СКОРОСТЯМИ, ИЗ КОТОРЫХ ОДИН ОБЛАДАЕТ БЕСКОНЕЧНО БОЛЬШОЙ МОЩНОСТЬЮ

Генератор бесконечно большой мощности, вращающийся с постоянной угловой скоростью, обеспечивает постоянство напряжения на общих шинах и постоянство частоты.

Вектор напряжения на векторной диаграмме (фиг. 11.1), относящийся к рассматриваемому случаю параллельной работы генераторов, оказывается постоянным по величине и сохраняющим свое положение. Напряжение U при этом равно э. д. с. E_1 большого генератора, так как

Для машин турбогенераторного типа реактанц по продольной и поперечной осям одинаков, т. е. $x_d = x_q$. Тогда

$$x_q x_d + r_a^2 = x_d^2 + r_a^2 = z_k^2.$$

В этом случае

$$P_a = m \frac{U}{z_k} [E_0 \sin(\alpha + \theta) - U \sin \alpha], \quad (11.7)$$

где $\operatorname{tg} \alpha = \frac{r_a}{x_d}$.

Для машин с явно выраженными полюсами активная мощность определяется полной формулой (11.6).

Однако более просто выражение для активной мощности в случае машины с явно выраженными полюсами можно получить, пренебрегая активным сопротивлением обмотки якоря по сравнению с реактивными сопротивлениями x_d и x_q . Тогда

$$P_a = \frac{mU}{x_d x_q} \left[E_0 x_q \sin \theta + \frac{U}{2} (x_d - x_q) \sin 2\theta \right]$$

или

$$P_a = mU \left[\frac{E_0 \sin \theta}{x_d} + \frac{U}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta \right]. \quad (11.8)$$

Если пренебречь активным сопротивлением r_a для машин турбогенераторного типа, то

$$P_a = m \frac{UE_0}{x_d} \sin \theta. \quad (11.9)$$

Последняя формула с достаточным приближением может быть использована для ориентировочного подсчета активной мощности как машин турбогенераторного типа, так и машин с явно выраженными полюсами.

Если в момент включения на параллельную работу э. д. с. генератора равна напряжению сети U , то при синхронном вращении полюсов в обмотке якоря тока не будет, ибо мгновенные значения э. д. с. генератора и напряжения сети взаимно уравновешиваются.

Если изменить возбуждение генератора, например, увеличить его, то увеличится э. д. с. E_0 , появится разность потенциалов ΔU , которая вызовет появление тока в цепи генератора и генератора бесконечной мощности (в сети).

Величину этого тока можно найти из равенства

$$I_y = \frac{\Delta U}{z}, \quad (11.10)$$

где z — полное сопротивление исследуемого генератора.

Так как $x_q \gg r_a$, то

$$I_y = \frac{\Delta U}{x_q}. \quad (11.11)$$

Отсюда видно, что ток I_y отстает по фазе от напряжения ΔU на 90° , т. е. является реактивным током.

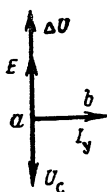
На векторной диаграмме (фиг. 11.3) вектор E изображает э. д. с. исследуемого генератора, а вектор U_c — напряжение сети, причем эти векторы взаимно уравновешивают друг друга и ток равен нулю, что соответствует моменту включения на параллельную работу. Если теперь увеличить возбуждение настолько, что э. д. с. генератора возросла на

величину ΔU , то ток I_y , появившийся в цепи генераторов, изобразится на основании выражения (11.11) вектором $\overline{ab}$.

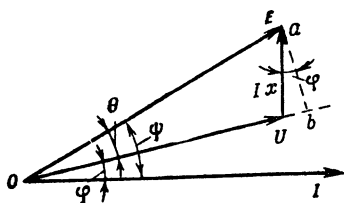
Из диаграммы видно, что этот ток по отношению к напряжению сети является током опережающим, а по отношению к э. д. с. генератора — отстающим. Отстающий ток создает поле, уменьшающее основной поток полюсов, а опережающий создает поле, увеличивающее поток полюсов.

Таким образом, ток I_y , появившийся в результате увеличения возбуждения, восстановит нарушенное равновесие.

Для генератора, работающего параллельно с генератором бесконечно большой мощности ($U=\text{const}$), влияние изменения возбуждения можно рассмотреть, пользуясь диаграммой фиг. 11.4, справедливой для машин турбогенераторного типа. С некоторой погрешностью, пренебрегая вторым членом в выражении (11.8), этой диаграммой можно пользоваться и для машин с явно выраженными полюсами.



Фиг. 11.3.
Векторная
диаграмма.



Фиг. 11.4. Векторная
диаграмма.

Опуская перпендикуляр (фиг. 11.4) из конца вектора E на направление вектора напряжения и обозначая его через $\overline{ab}$, получают

$$\overline{ab} = Ix \cos \varphi. \quad (11.12)$$

Но мощность генератора $P_a = UI \cos \varphi$, следовательно,

$$P_a = \frac{U}{x} \overline{ab}; \quad (11.13)$$

при $U=\text{const}$ и $x=\text{const}$ мощность генератора пропорциональна величине отрезка $\overline{ab}$.

Кроме того, для мощности генератора справедливо

$$P_a = \frac{UE}{x_d} \sin \theta = UI_{к.у} \sin \theta, \quad (11.14)$$

где $I_{к.у}$ — установившийся ток короткого замыкания, равный $\frac{E}{x_d}$; при $U=\text{const}$ $I_{к.у}=\text{const}$.

Мощность генератора пропорциональна синусу угла θ между э. д. с. и напряжением.

Векторная диаграмма, изображенная на фиг. 11.5, соответствует случаю, когда генератор работает параллельно сети, имея некоторый ток возбуждения i_1 ; величина э. д. с., отвечающая этому возбуждению, равна E_1 ; при этом ток, отдаваемый генератором во внешнюю сеть, пусть будет I_1 , а мощность, отдаваемая им в сеть, P_1 .

Если изменяется ток возбуждения, то соответственно изменяется по величине и э. д. с. E ; напряжение же сети U остается строго постоянным как по величине, так и по направлению. Так как при этом мощность генератора не меняется, потому что не меняется мощность, потребляемая

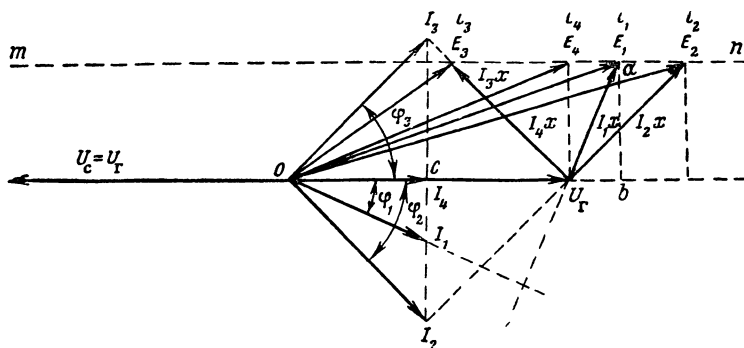
первичным двигателем, то согласно формуле (11.13) отрезок ab остается постоянным, т. е. конец вектора э. д. с. будет перемещаться по линии mn , параллельной вектору напряжения. Следовательно, при увеличении тока возбуждения до величины i_2 величина э. д. с. будет соответственно равна E_2 ; вектор, соединяющий концы векторов U и E_2 , изображает величину $I_2 \cdot x$, где I_2 — ток генератора при возбуждении i_2 и э. д. с. E_2 . Вектор тока перпендикулярен к вектору $I_2 \cdot x$. Так как активная мощность по величине не изменилась, то

$$P_1 = UI_1 \cos \varphi = UI_2 \cos \varphi_2 \quad (11.15)$$

или

$$I_1 \cos \varphi_1 = I_2 \cos \varphi_2, \quad (11.16)$$

т. е. активная составляющая тока I остается без изменения. Концы векторов I_1 и I_2 лежат на одной вертикальной линии.



Фиг. 11.5. Векторная диаграмма синхронного генератора, работающего параллельно с сетью, при изменении возбуждения.

Аналогично строится вектор тока I_3 , соответствующий э. д. с. E_3 и току возбуждения i_3 .

Таким образом, изменение возбуждения вызывает изменение тока генератора как по величине, так и по фазе. Если изобразить графически изменение $I = f(i_b) = f(E)$, то эта зависимость имеет вид U-образной кривой.

Изменение тока I происходит за счет ее реактивной составляющей $I \sin \varphi$, активная составляющая тока $I \cos \varphi$ остается постоянной, следовательно, изменить активную нагрузку генератора путем изменения возбуждения нельзя.

Можно подобрать такое возбуждение для данного генератора, чтобы ток, создаваемый им, был минимальным; в этом случае ток (I_4 на векторной диаграмме фиг. 11.5) является активным током, угол ϕ равен нулю; увеличение возбуждения вызывает появление отстающего тока ($\varphi > 0$), а уменьшение возбуждения — опережающего тока ($\varphi < 0$), т. е. недо возбужденный синхронный генератор работает с опережающим напряжением током, а перевозбужденный — с отстающим.

U-образные кривые характеризуют работу машины при постоянной мощности ($P = \text{const}$) и переменном возбуждении ($i_b = \text{var}$). Для каждого генератора снимается несколько U-образных кривых, каждая кривая соответствует определенной мощности.

На фиг. 11.6 приведены кривые для случая $P_3 > P_2 > P_1$, пунктирная кривая снята при холостом ходе. По мере увеличения мощности вершины кривых перемещаются вверх и вправо, так как при увеличении нагрузки,

для того чтобы получить то же напряжение, возбуждение должно быть увеличено.

Работа машины определяется пограничными прямыми mn и gh . При мощности, равной P_1 , машина может работать без перегрева от точки a до точки b , $\cos \varphi$ при этом будут различны. Правее точки b будет перегрев обмотки ротора, левее точки a — перегрев обмотки статора.

На характер U-образных кривых оказывает влияние величина синхронного сопротивления машины x . При малых значениях x U-образные кривые получаются более острыми, чем при больших значениях x .

Таким образом, для того чтобы мощность синхронного генератора была положительной, т. е. для того, чтобы машина отдавала ток в сеть, необходимо соблюдение неравенства $\theta > 0$.

Существенным признаком генераторного режима синхронной машины, работающей параллельно с сетью или с другими синхронными машинами, является то, что вектор внутренней э. д. с. машины E_0 , наводимой основным потоком полюсов, опережает вектор напряжения U .

Чем больше активная мощность генератора, тем больше угол η и тем больше расходятся векторы E_0 и U , причем векторы E_0 и U как бы образуют друг с другом упругую связь. Нагрузка стремится растянуть эту связь между векторами и, таким образом, увеличить угол η . Эта упругая связь между векторами E_0 и U вызвана наличием реактансов синхронной машины. Если бы машина обладала лишь активными сопротивлениями, то параллельная работа синхронных машин была бы невозможна.

Кроме активной мощности P_a , в генераторах различают электромагнитную мощность:

$$P_s = m(UI \cos \varphi + I^2 r_a). \quad (11.17)$$

Первое слагаемое электромагнитной мощности генератора является активной мощностью, а второе — тепловыми потерями в цепи якоря.

Из векторной диаграммы фиг. 11.2 следует, что

$$P_s = m(UI \cos \varphi + I^2 r_a) = mI(U \cos \varphi + I r_a) = mI E_0 \cos \psi = m E_0 I_q,$$

т. е. электромагнитная мощность генератора равна произведению внутренней э. д. с. генератора на поперечную составляющую тока.

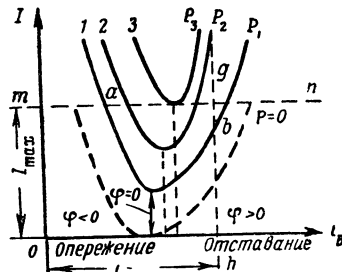
Используя найденное ранее выражение для I_q (11.14), электромагнитную мощность генератора можно выразить следующим образом:

$$P_s = m E_0 I_q = \frac{m E_0}{x_q x_d + r_a^2} [E_0 r_a - U r_a \cos \theta + U x_d \sin \theta]. \quad (11.18)$$

Для генераторов турбогенераторного типа $x_d = x_q$. Тогда

$$\begin{aligned} r_a &= z_k \sin \alpha, \\ x_d &= x_q = z_k \cos \alpha, \\ P_s &= \frac{m E_0}{z_k} [U \sin (\theta - \alpha) + E_0 \sin \alpha]. \end{aligned} \quad (11.19)$$

Из последнего выражения непосредственно видно, какие факторы оказывают существенное влияние на создание внутренней (электромагнитной) мощности машины.



Фиг. 11.6. U-образные кривые синхронного генератора.

Эта внутренняя мощность синхронного генератора требует от приводящего его во вращение двигателя определенного крутящего момента, который необходим для создания этой внутренней мощности генератора и может быть определен из соотношения

$$P_g = M_g \omega_m, \quad (11.20)$$

где P_g — электромагнитная мощность генератора;

ω_m — механическая угловая скорость вращения двигателя;

M_g — электромагнитный момент генератора,

или

$$M_g = \frac{P_g}{\omega_m}. \quad (11.21)$$

Как видно из выражений (11.19) и (11.20), момент, который должен развивать двигатель для того, чтобы превратить механическую энергию в найденную выше электрическую (электромагнитную мощность), зависит от нагрузки машины и от углов θ и α . Зависимость электромагнитного момента или пропорциональной ему величины электромагнитной мощности генератора от угла θ может быть построена из векторной диаграммы генератора. Зависимость эта приведена на фиг. 11.7.

Так как обычно $E_0 > U$, то при $\theta \neq 0$ электромагнитный момент имеет некоторое положительное значение.

Как видно из фиг. 11.7, кривая зависимости $M_g = f(\theta)$ имеет максимум. Если пренебречь углом α , то этот максимум имеет место при $\theta_m = \frac{\pi}{2}$.

Фиг. 11.7. Зависимость электромагнитной мощности и электромагнитного момента генератора от угла θ .

Если при некоторой нагрузке генератор развивает электромагнитную мощность P_{g1} , характеризуемую углом θ_1 (фиг. 11.7), то при изменении нагрузки генератора равновесие оказывается возможным при некоторой иной величине $\theta = \theta_2$.

Как видно из фиг. 11.7, увеличение нагрузки вызывает в этом случае увеличение угла θ , а это означает, что имеет место избыток момента нагрузки над моментом первичного двигателя, и агрегат уменьшит скорость вращения, что заставляет регулятор воздействовать, например, на расход топлива в двигателе, в результате чего вращающий момент двигателя увеличивается и равновесие наступает при $\theta = \theta_2$.

Из фиг. 11.7 следует, что те же самые мощности P_{g1} и P_{g2} можно получить при иных, больших углах θ ($\theta > \frac{\pi}{2}$). Однако нетрудно убедиться, что на этом участке кривой при увеличении нагрузки увеличение θ ведет к уменьшению противодействующего момента, и генератор выпадает из синхронизма. Следовательно, устойчивым участком кривой $M_g = f(\theta)$ является участок слева от максимального значения M_g . Очевидно, что устойчивость работы генератора при заданной максимальной нагрузке можно увеличить, увеличив максимум M_g , т. е. увеличив E_0 , что можно сделать посредством увеличения возбуждения машины.

Для того чтобы в случае внезапного короткого замыкания или резкого изменения нагрузки генератор не выпадал из синхронизма при

параллельной работе с другими машинами (например, вследствие размагничивающего действия реакции якоря), необходимо быстро увеличить его возбуждение. Поэтому генератор должен быть снабжен не простым возбуждением, а скородействующим. Особенно важно оборудовать генераторы скородействующим возбуждением в том случае, если они предназначены для параллельной работы.

Весьма неблагоприятными свойствами в этом отношении обладает генератор только с параллельным самовозбуждением. Такой генератор имеет значительно меньшую величину максимального электромагнитного момента, и при коротком замыкании в цепи якоря генератора возбуждение его уменьшается (в то время как для поддержания устойчивой работы генератора его необходимо быстро увеличить) и машина может быть даже полностью размагничена токами короткого замыкания. Естественно, что такой генератор не может быть использован для параллельной работы с другими машинами, так как система в этом случае не будет обладать должной степенью устойчивости. Этот недостаток устраняется при применении смешанного самовозбуждения.

Таким образом, если для увеличения статической устойчивости генератора необходимо увеличивать его электромагнитный момент или возбуждение, то для повышения динамической устойчивости генератора необходимо использовать для его возбуждения быстродействующие возбудители, способные поддерживать магнитный поток в машине при резких изменениях нагрузки, или применять компаундирование.

Генератор, работающий параллельно с сетью или с другими генераторами, связан с ними как бы некоторой упругой связью. До тех пор, пока величина упругой силы, стремящейся привести генератор в синхронизм с сетью, не превзошла некоторого максимального значения, он может работать параллельно с сетью; если же это максимальное значение упругой связи превзойдено, он выпадает из синхронизма.

Жесткость этой упругой связи генератора с сетью или синхронизирующая сила, действующая на генератор, характеризуется производной электромагнитной мощности (или электромагнитного момента) по углу θ :

$$P_s = \frac{dP_s}{d\theta}, \quad (11.22)$$

где P_s — синхронизирующая мощность, характеризующая жесткость упругой связи генератора с сетью;

P_s — электромагнитная мощность генератора;

θ — угол между векторами E_0 и U ,

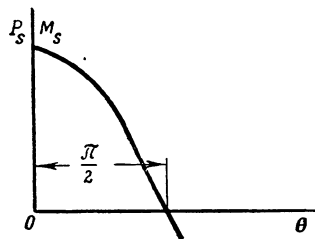
или

$$M_s = \frac{P_s}{9,81 \omega_{\max}}, \quad (11.23)$$

где M_s — синхронизирующий момент, характеризующий жесткость упругой связи генератора с сетью.

Из уравнений (11.19) и (11.22) следует, что P_s может быть представлена в следующем виде:

$$P_s = \frac{mE_0U \cos(\theta - \alpha)}{z_k}. \quad (11.24)$$



Фиг. 11.8. Зависимость синхронизирующей мощности и синхронизирующего момента генератора от угла θ .

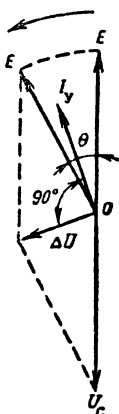
На фиг. 11.8 изображена зависимость синхронизирующей мощности (или синхронизирующего момента) от угла θ . Как видно из фиг. 11.8,

при $\theta > \frac{\pi}{2}$ P_s становится отрицательной и работа машины становится статически неустойчивой.

Очевидно, что синхронизирующая мощность или жесткость упругой связи генератора с сетью зависит от нагрузки генератора, так как с изменением нагрузки изменяется угол θ . С увеличением нагрузки угол θ растет и синхронизирующая мощность уменьшается, т. е. генератор начинает работать менее устойчиво. При номинальной нагрузке генератора угол θ лежит в пределах 15—20°.

§ 11.3. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПРИ ПОСТОЯННОМ ВОЗБУЖДЕНИИ И ПЕРЕМЕННОЙ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ (ПЕРЕВОД НАГРУЗКИ)

Для того чтобы нагрузить или разгрузить генератор, включенный на параллельную работу с сетью или с другими генераторами, необходимо воздействовать на двигатель, приводящий в движение генератор. Чтобы нагрузить данный генератор, следует увеличить его электрическую мощность, а это можно сделать только увеличивая момент вращения, приложенный к генератору. В этом случае ротор генератора стремится увеличить скорость вращения, т. е. опередить роторы других генераторов на некоторый угол; тогда э. д. с. этого генератора опередит э. д. с. других генераторов по фазе, а это как раз и вызовет увеличение электрической мощности данного генератора. Согласно выражению (11.9) для увеличения мощности генератора необходимо, не изменяя э. д. с. по величине, изменить ее по фазе, т. е. увеличить угол θ между напряжением U и э. д. с. E . В результате такого опережения получается некоторая разность потенциалов ΔU , которая вызывает появление в цепи генераторов уравнительного тока I_y , величина которого определяется формулой



Фиг. 11.9.
Векторная
диаграмма
синхронного
генератора
для случая
перехода ге-
нератора от
режима хо-
лостого хода
к нагрузке.

$$I_y = \frac{\Delta U}{x + x_c}, \quad (11.25)$$

а по фазе этот ток I_y отстает от напряжения ΔU на 90°.

На векторной диаграмме фиг. 11.9 изображен случай перехода генератора от режима холостого хода, т. е. от случая, когда э. д. с. E уравновешена напряжением сети U_c , к нагрузке генератора.

На векторной диаграмме фиг. 11.9 увеличение нагрузки изображается тем, что вектор E перемещается на угол θ ; получающаяся разность потенциалов ΔU изображается геометрической суммой векторов E и U_c ; ток I_y генератора изображается на этой же диаграмме вектором, отстающим от ΔU на угол 90°. Из диаграммы видно, что этот ток почти совпадает по фазе с э. д. с. исследуемого генератора, т. е. является током активным или током нагрузки для данного генератора, а по отношению к напряжению сети этот ток находится почти в противофазе, т. е. является для генератора, питающего сеть (в рассматриваемом случае генератора бесконечной мощности) током разгрузки. Таким образом, исследуемый генератор нагружается током I_y .

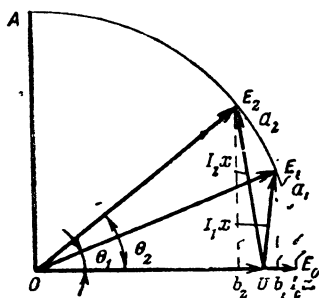
Изменение электрической мощности генератора, работающего параллельно с сетью, при изменении э. д. с. по фазе можно проследить по векторной диаграмме напряжений (фиг. 11.10).

Электрическая мощность, отдаваемая генератором во внешнюю сеть, равна

$$P = ka_1 b_1 = k_1 \sin \theta. \quad (11.26)$$

Увеличивая путем воздействия на двигатель, приводящий во вращение генератор, момент, приложенный к генератору, получают положение вектора э. д. с. E_2 , определяемое углом θ_2 ; конец вектора э. д. с. будет описывать окружность, а мощность для этого случая $P_2 = ka_2 b_2 = k_1 \sin \theta_2$. Наибольшая мощность соответствует $\theta = 90^\circ$, при $\theta = 0$ мощность равна нулю.

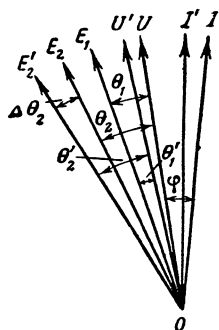
Таким образом, всякое изменение по фазе э. д. с. генератора, работающего параллельно с другими, вызывает изменение нагрузки этого генератора; изменение же э. д. с. данного генератора по фазе обуславливается положением ротора этого генератора относительно роторов других генераторов, причем опережение влечет за собой увеличение нагрузки на этот генератор, а отставание — уменьшение.



Фиг. 11.10. Векторная диаграмма для случая изменения электрической мощности генератора, работающего параллельно с сетью, при изменении э. д. с. по фазе.

§ 11.4. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ДВУХ СРАВНИМЫХ ПО МОЩНОСТИ ГЕНЕРАТОРОВ

При параллельной работе двух генераторов, сравнимых по мощности и вращающихся с постоянными угловыми скоростями, характер явлений, сопровождающих их работу, в основном тот же, что и в предыдущем случае.



Фиг. 11.11. Векторная диаграмма для случая перевода нагрузки с одного генератора на другой.

Главным отличием этого случая является то, что здесь при изменениях углов опережения θ вектор напряжения U на шинах не остается на диаграмме неподвижным, как это было в случае, когда один генератор обладал бесконечно большой мощностью. В то же время и величина напряжения на шинах (величина вектора U на диаграмме) не может оставаться неизменной в тех случаях, когда нагрузка генераторов изменяется и происходит изменение возбуждения генераторов.

Как происходит перевод нагрузки с одного генератора на другой, можно качественно рассмотреть по диаграмме фиг. 11.11. На этой диаграмме вектор U представляет напряжение на шинах параллельно работающих генераторов; вектор I представляет ток, отдаваемый обоими генераторами в сеть, а векторы E_1 и E_2 изображают э. д. с. первого и второго генераторов.

Развиваемая первым генератором полная мощность определяется углом θ_1 , а для второго — углом θ_2 .

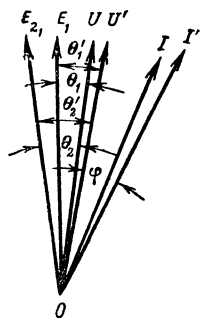
Если одному из генераторов, например, второму, сообщить некоторое опережение, то вектор его э. д. с. переместится вперед (влево на диаграмме) на некоторый угол $\Delta \theta_2$; вместе с этим переместится несколько вперед и вектор U (в положение U'), а также и вектор I (в положение I').

Мощности, генерируемые после этого генераторами, определяются углами θ'_1 и θ'_2 . Мощность второго генератора возрастает, а мощность

первого соответственно уменьшается. Таким образом, совершается перевод некоторой части нагрузки с первого генератора на второй.

В случае если потребление энергии в сети возрастет, то для двух агрегатов, подобных между собой, на диаграмме фиг. 11.12 это выразится тем, что векторы тока I и напряжения U переместятся в положения I' и U' так, что мощности генераторов определяются теперь соответственно углами θ_1' и θ_2' .

Вектор тока при этом возрастет, а вектор напряжения немного уменьшится, если возбуждение генераторов остается неизменным. Для того чтобы напряжение сети осталось неизменным, необходимо соответственно увеличить возбуждение обоих генераторов.



Фиг. 11.12. Векторная диаграмма для случая перевода нагрузки с одного генератора на другой.

Если на общую сеть работает параллельно несколько одинаковых генераторов, то мощность между ними распределяется приблизительно пропорционально их углам упреждения. Общая мощность всех генераторов (в случае одинаковых генераторов) приблизительно пропорциональна сумме углов опережения всех генераторов. Для перевода нагрузки с одной группы машин на другую необходимо, воздействуя на регуляторы механических двигателей этих агрегатов, создать необходимое опережение роторов, а желая сохранить неизменной частоту сети, приходится в то же время уменьшать углы θ для остальных машин и притом так, чтобы сумма уменьшений углов их опережения равнялась сумме увеличений углов первой группы машин.

Если сетью потребляется, кроме активного, и реактивный ток, то ток этот распределяется между всеми параллельно работающими генераторами и при этом поровну, если возбуждение их одинаково. Перевод реактивного тока с одной машины (или с группы машин) на другие достигается уменьшением возбуждения этой машины. Для поддержания неизменным напряжения на шинах необходимо одновременно с уменьшением возбуждения одной машины (или группы машин) соответственно увеличивать возбуждение остальных машин.

Следует отметить, что для получения наименьших потерь в меди якорей параллельно работающих генераторов одинаковой мощности необходимо распределять между ними реактивный ток, потребляемый сетью, поровну; для этого требуется устанавливать во всех генераторах одинаковое возбуждение.

Правильное распределение нагрузок и реактивных токов между совместно работающими генераторами сравнительно легко достигается с помощью специальных регуляторов.

При необходимости вывода из работы одного из генераторов следует сначала перевести с него нагрузку на остальные генераторы, а затем перевести с него и реактивный ток (уменьшая его возбуждение). После этого можно выключить генератор, не вызывая толчка нагрузки в оставшихся в работе машинах и не получая никаких колебаний напряжения на шинах.

§ 11.5. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНЫХ МОЩНОСТЕЙ МЕЖДУ ПАРАЛЛЕЛЬНО РАБОТАЮЩИМИ САМОЛЕТНЫМИ СИНХРОННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

При нормальной параллельной работе самолетных синхронных генераторов они должны работать с одинаковыми коэффициентами мощности, и активные мощности, отдаваемые генераторами в сеть, должны

быть пропорциональны их номинальным мощностям. Если номинальные мощности параллельно работающих генераторов одинаковы (в самолетных условиях обычно так и бывает), то активная мощность, отдаваемая каждым из генераторов в сеть, должна быть одинаковой для всех генераторов.

Поддержание одинаковых коэффициентов мощности генераторов осуществляется с помощью автоматического воздействия на цепи возбуждения генераторов через регуляторы напряжения, как это описано в § 10.4. Для выравнивания активных мощностей генераторов применяются специальные схемы.

Известно, что для изменения активной мощности генератора, работающего параллельно с другими на общие шины или сеть, необходимо воздействовать на первичный двигатель этого генератора (в самолетных установках на гидропривод постоянной скорости или воздушную турбину). Так, например, если активная мощность одного из n параллельно работающих генераторов возрастет, то необходимо уменьшить вращающий момент, передаваемый на вал этого генератора. Таким образом, при параллельной работе самолетных синхронных генераторов необходимо иметь устройство, реагирующее на активную мощность каждого генератора и способное производить соответствующую корректировку вращающих моментов, передаваемых на валы генераторов.

На фиг. 11.13 приведена одна из возможных схем, которая позволяет получать напряжение, пропорциональное активной составляющей тока генератора (при равномерной нагрузке фаз). Как видно из схемы, напряжение фазы A делится пополам (в точке a), и каждая половина этого напряжения используется для питания первичных обмоток трансформаторов T_1 и T_2 .

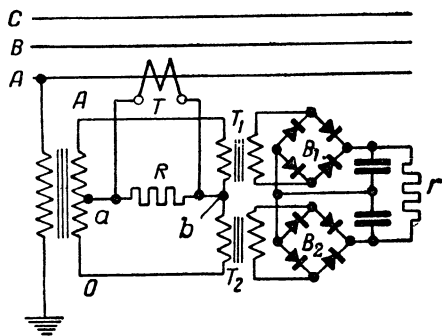
Посредством трансформатора тока T последовательно с напряжением, питающим первичные обмотки трансформаторов T_1 и T_2 , в схему вводится напряжение, пропорциональное току в фазе A ($I_A R$). Напряжения, снимаемые со вторичных обмоток трансформаторов T_1 и T_2 , с помощью выпрямительных мостов B_1 и B_2 выпрямляются и взаимно вычитаются на сопротивлении r . Таким образом, выпрямленное напряжение, которое снимается с сопротивления r , пропорционально разности абсолютных величин вторичных напряжений трансформаторов T_1 и T_2 .

$$U_a = k(|U_{ob}| - |U_{ba}|), \quad (11.27)$$

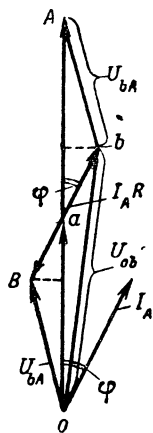
где k — множитель пропорциональности.

Из векторной диаграммы, приведенной на фиг. 11.14, следует, что разность абсолютных величин напряжений U_{ob} и U_{ba} пропорциональна активному току генератора. В самом деле, если провести вектор OB , равный вектору напряжения U_{ba} , то нетрудно видеть, что при малых величинах $I_A R$ разность абсолютных значений напряжений U_{ob} и U_{ba} можно заменить разностью их проекций на напряжение U_{oa} .

$$(|U_{ob}| - |U_{ba}|) \approx 2I_A R \cos \varphi. \quad (11.28)$$



Фиг. 11.13. Принципиальная схема для получения напряжения, пропорционального активной составляющей тока генератора.



Фиг. 11.14. Векторная диаграмма для схемы фиг. 11.13.

Подставляя в формулу (11.27), получают

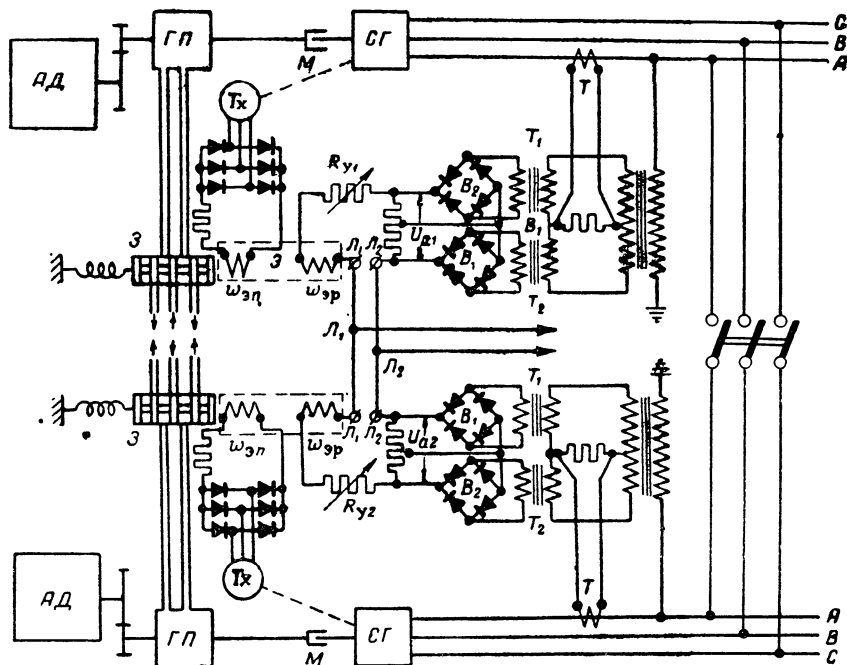
$$U_a = 2kRI_A \cos \varphi, \quad (11.29)$$

т. е. напряжение на выходе схемы пропорционально активному току $I_a \cos \varphi$.

На фиг. 11.15 приведена схема, обеспечивающая должное распределение активных мощностей параллельно работающим генераторам.

Синхронные генераторы СГ приводятся во вращение от гидравлических приводов постоянной скорости ГП, обеспечивающих поддержание постоянной скорости выходного вала (вала генератора) при переменной скорости входного вала (вала авиадвигателя).

Выходной вал привода соединен с валом генератора через муфту свободного хода М, которая обеспечивает одностороннюю передачу вращающего момента от гидропривода к генератору. Если скорость вращения генератора по каким-либо причинам начинает превышать скорость вращения выходного вала гидропривода, то муфта расцепляет валы привода и генератора, не допуская передачу вращающего момента на вал гидропривода. Назначение этой муфты освещено ниже. Регулирование скорости вращения осуществляется посредством золотника З, управляющего гидравлическим приводом ГП. В свою



Фиг. 11.15. Принципиальная схема для обеспечения должного распределения активных мощностей параллельно работающих генераторов.

очередь, поршень золотника З управляется с помощью электромагнита Э. Электромагнит Э имеет две обмотки, контрольную $\omega_{э.н}$ и корректирующую $\omega_{э.р}$. Контрольная обмотка $\omega_{э.н}$ питается выпрямленным напряжением, пропорциональным скорости вращения тахогенератора Тх.

Корректирующая обмотка $w_{\text{з.р}}$ питается от напряжения U_a , пропорционального активному току генератора. Это напряжение снимается с описанной выше измерительной схемы (фиг. 11.13).

Контрольная обмотка обеспечивает постоянство скорости вращения генератора (частоты генерируемого тока), корректирующая обмотка обеспечивает правильное распределение активных мощностей.

В цепи корректирующей обмотки включено установочное сопротивление R_y для настройки схемы.

В дальнейшем сумма установочного сопротивления R_y и сопротивления корректирующей обмотки электромагнита $R_{\text{з.р}}$ обозначается через R_i , где значок i указывает порядковый номер работающего параллельно с сетью синхронного генератора.

Точки $\mathcal{L}_1$ и $\mathcal{L}_2$ соединяются с соответствующими точками $\mathcal{L}_1$ и $\mathcal{L}_2$ остальных n параллельно работающих генераторов согласно схеме, приведенной на фиг. 11.16. Таким образом, корректирующие цепи всех генераторов оказываются соединенными параллельно.

Можно принять, что у всех генераторов установочные сопротивления R_{yi} и сопротивления корректирующих обмоток равны, т. е.

$$R_1 = R_2 = \dots = R_i = \dots = R_n = R.$$

Если напряжение между точками $\mathcal{L}_1$ и $\mathcal{L}_2$ обозначить через U , то на основании первого закона Кирхгофа для точки $\mathcal{L}_1$ можно написать

$$\frac{U - U_{a1}}{R} + \frac{U - U_{a2}}{R} + \dots + \frac{U - U_{ai}}{R} + \dots + \frac{U - U_{an}}{R} = 0, \quad (11.30)$$

где U_{ai} — напряжение, снимаемое с измерительной схемы для i -того генератора (см. фиг. 11.15).

Из последнего равенства следует

$$U = \frac{U_{a1} + U_{a2} + U_{a3} + \dots + U_{an}}{n}. \quad (11.31)$$

Таким образом, напряжение между точками $\mathcal{L}_1$ и $\mathcal{L}_2$ равно среднему арифметическому падений напряжений на сопротивлениях R .

Очевидно, для токов i_{a1} и i_{an} можно написать

$$i_{a1} = \frac{U - U_{a1}}{R}; \quad (11.32)$$

$$i_{an} = \frac{U - U_{an}}{R}. \quad (11.33)$$

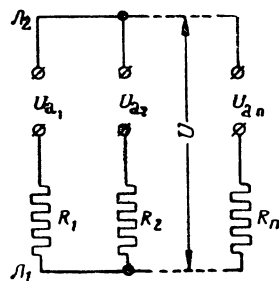
Если активная нагрузка на всех генераторах одна и та же, то активные составляющие токов нагрузки и, следовательно, напряжения на выходе измерительных схем будут одинаковыми, т. е.

$$U_{a1} = U_{a2} = \dots = U_{ai} = \dots = U_{an} = U.$$

Следовательно,

$$i_{a1} = i_{a2} = \dots = i_{ai} = \dots = i_{an} = 0.$$

Корректирующие обмотки всех регуляторов скорости вращения в этом случае обесточены. Когда активная нагрузка одного или нескольких генераторов изменяется, то ток в соответствующих корректирующих обмотках также изменяется.



Фиг. 11.16. Принципиальная схема включения установочных сопротивлений в случае n параллельно работающих генераторов.

Величины корректирующих токов пропорциональны отклонениям корректирующих напряжений от средней величины напряжения U . Следовательно, корректирующее действие соответствующих обмоток пропорционально отклонению активной нагрузки генераторов от средней активной нагрузки, приходящейся на один генератор. Так, например, если активная нагрузка на первый генератор уменьшится, то в корректирующей обмотке первого генератора появится ток $i_{a1} > 0$, который приведет к увеличению вращающего момента на валу этого генератора и к выравниванию активной нагрузки. Следует отметить, что одновременно в корректирующих обмотках остальных генераторов также появятся токи за счет некоторого уменьшения среднего напряжения U (из-за уменьшения напряжения U_{a1}).

Нетрудно видеть, что эти токи имеют другой знак, чем ток i_{a1} , поэтому одновременно с увеличением вращающего момента на валу первого генератора уменьшатся вращающие моменты на валу остальных генераторов. Когда активные нагрузки всех генераторов выравниваются, корректирующие токи снова будут отсутствовать.

Большой интерес представляет поведение системы при неисправностях привода генератора и системы регулирования скорости вращения, вызывающих вращение генератора с повышенной или с пониженной скоростью вращения. Как правило, привод самолетных синхронных генераторов оборудуется муфтами свободного хода, обеспечивающими передачу вращающего момента только в направлении от авиационного двигателя на вал генератора.

Если вал генератора начинает обгонять вал привода, то происходит проскальзывание муфты свободного хода. Поведение системы при различных неисправностях привода существенно зависит от того, оборудован привод генераторов муфтами свободного хода или нет.

Чрезмерно большая скорость вращения одного из параллельно работающих генераторов приводит к перегрузке этого генератора активной мощностью.

Если один генератор способен покрыть всю потребляемую активную мощность в сети, то он принимает ее всю на себя. Уравнительная цепь активных мощностей при этом стремится увеличить скорость вращения исправных генераторов, которые при наличии муфт свободного хода будут обгонять свои приводы, т. е. валы этих генераторов будут проскальзывать относительно валов привода. Частота тока в сети значительно возрастает, однако напряжение в сети остается неизменным и исправные генераторы продолжают доставлять свою долю реактивной мощности в сеть.

В случае когда муфты свободного хода отсутствуют, неисправный генератор перегружается активной мощностью, которую он доставляет к приводам исправных генераторов. В результате чрезмерной перегрузки неисправного генератора он выпадает из синхронизма, и в системе возникают большие колебания мощности.

Если скорость одного из параллельно работающих генераторов по каким-либо причинам уменьшится, то этот генератор разгрузится от активной мощности, а остальные генераторы примут на себя активную мощность неисправного генератора. Частота тока в сети уменьшится при наличии муфт свободного хода и значительном снижении скорости привода неисправного генератора. Остальные генераторы будут доставлять активную мощность к неисправному генератору.

Неисправный генератор, работая в двигательном режиме, вызывает проскальзывание своей муфты свободного хода. Однако свою долю

реактивной мощности неисправный генератор будет продолжать отдавать в сеть.

Так как мощность, потребная на обеспечение проскальзывания муфты свободного хода неисправного генератора, невелика, то неисправный генератор целесообразно оставить подключенным к сети, учитывая, что он продолжает нести соответствующую реактивную нагрузку.

§ 11.6. ВКЛЮЧЕНИЕ САМОЛЕТНЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ

Для того чтобы подключение самолетного синхронного генератора к остальным параллельно работающим генераторам не сопровождалось толчками тока и качаниями роторов машин, необходимо обеспечить равенство амплитуд и строгую синфазность напряжений подключаемого генератора и сети в момент включения. В практике для обеспечения условий синхронизации используются специальные средства.

В случае когда реактанс самолетных синхронных генераторов велик, для включения на параллельную работу может быть использован метод самосинхронизации. Сущность метода самосинхронизации заключается в следующем.

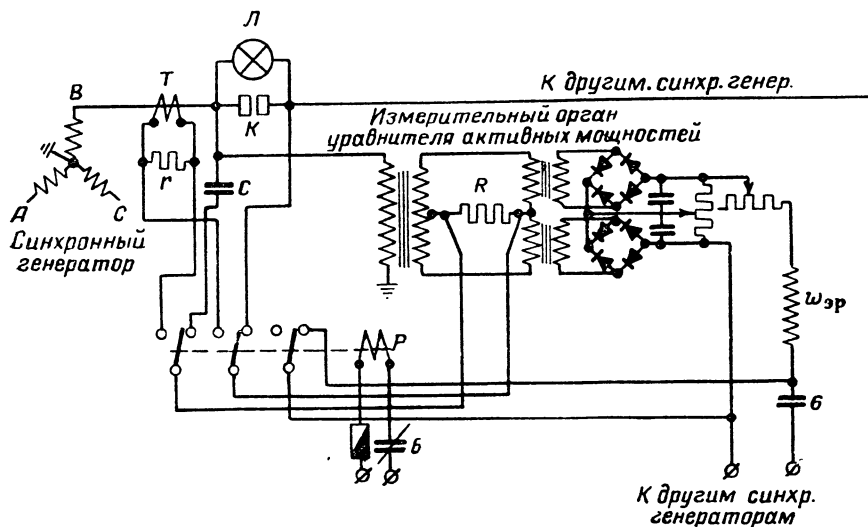
Подключаемый синхронный генератор, предварительно раскрученный до скорости, близкой к синхронной, включается к генераторным шинам при замкнутой накоротко цепи возбуждения.

При таком включении подключаемая синхронная машина работает в режиме асинхронного двигателя и будет подтягиваться к синхронной скорости вращения за счет возникающего при этом крутящего момента. Этот крутящий момент обусловлен асинхронным и реактивным моментами. Для явнополюсных машин, у которых $x_d \neq x_q$, величина реактивного момента может достигать значительной величины. Окончательное вхождение в синхронизм наступает через небольшой промежуток времени после переключения обмотки возбуждения генератора на постоянное напряжение по своей нормальной схеме; при этих условиях возникающий синхронный момент втягивает ротор генератора в синхронизм с самолетной электрической сетью. Включение генератора методом самосинхронизации вызывает кратковременные всплески тока и посадку напряжения, которые могут привести в некоторых случаях к значительным механическим ударам на валу машины. При неблагоприятном стечении обстоятельств и небольшой величине реактанса генератора это может привести к поломке вала или муфты и даже к возникновению колебаний роторов машин.

Очевидно, что если приключение генераторов к сборным шинам будет производиться часто, то это может привести к ослаблению механических передач и конструкции генераторов. Поэтому в самолетных условиях этот метод синхронизации целесообразно применять лишь в аварийных случаях, когда возникает необходимость быстрого включения генератора в сеть.

При нормальных условиях работы целесообразно прибегать к специальным устройствам для синхронизации подключаемого генератора. В качестве одной из таких наиболее простых систем для синхронизации приведена схема устройства, изображенная на фиг. 11.17. В этом устройстве для точной синхронизации подключаемого генератора используется схема регулирования распределения активных мощностей (см. § 11.5). Эта система синхронизации является полуавтоматической, так как она требует предварительной грубой синхронизации вручную, а также ручного включения генератора в сеть, после того как погаснет лампочка синхронизации L .

Реле синхронизации P осуществляет переключение входа чувствительного элемента измерителя активной мощности с трансформатора тока T на напряжение скольжения. Когда генератор отключен от сети, то контакты главного контактора K разомкнуты, а контакты $б$ находятся в положении, соответствующем изображенному на схеме фиг. 11.17. При этом реле синхронизации P удерживает свои контакты в правом крайнем положении и напряжение биений с контактов контактора K через конденсатор C подводится на вход чувствительного элемента (на сопротивление R). Одновременно реле P своими крайними правыми контактами подключает к выходу измерительной схемы корректирующую обмотку электромагнита $\omega_{э.р.}$.



Фиг. 11.17. Принципиальная схема устройства для синхронизации генератора при включении на параллельную работу с ручной подрегулировкой скорости вращения.

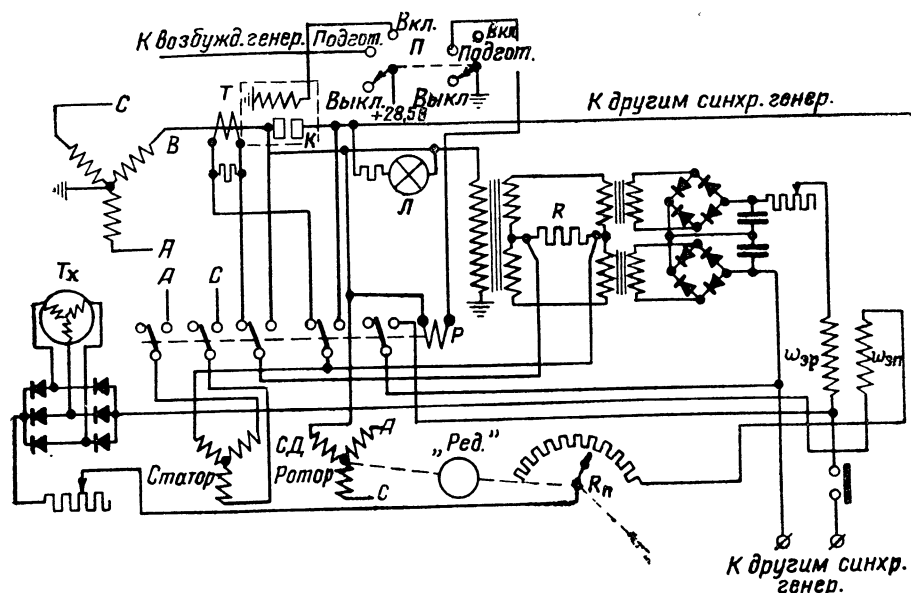
В результате действия корректирующей обмотки скорость вращения синхронного генератора (которая предварительно вручную была подведена близко к синхронной скорости) будет изменяться так, чтобы свести к нулю сигнал на входе измерительного устройства, т. е. свести напряжение биений к нулю. Когда это будет достигнуто, то лампочка синхронизации L погаснет и генератор может быть включен в сеть (включение осуществляется вручную). Сопротивление r , включенное на зажимы вторичной обмотки трансформатора T , предотвращает перенапряжение при включении генератора.

Схема более совершенного синхронизатора, не требующая первоначальной ручной подрегулировки скорости вращения генератора, приведена на фиг. 11.18. При положении переключателя Π в положении «Выкл.» генератор не возбужден и главный контактор K выключен. При установке выключателя Π в положение «Подготовка» генератор возбуждается, включается реле синхронизации P и подается питание на дифференциальный сельсин $СД$. (Статор дифференциального сельсина включается на напряжение сети, ротор — на напряжение генератора.) Ротор дифференциального сельсина вращает движок реостата R_n через редуктор «Ред.» со скоростью, пропорциональной частоте скольжения. Реостат R_n включен последовательно в цепь контрольной обмотки $\omega_{э.н.}$, посредством которой регулируется скорость вращения генератора (§ 11.5). Движок реостата R_n вращается в таком направлении, чтобы

привести скорость вращения генератора к синхронной. Грубая синхронизация с помощью дифференциального сельсина и реостата R_n позволяет за несколько секунд привести частоту скольжения к небольшой величине.

В дальнейшем точная синхронизация осуществляется с помощью уравнивателя активных мощностей, вход которого включается на частоту скольжения одновременно с включением дифференциального сельсина контактами реле P . Точная синхронизация с помощью уравнивателя активных мощностей осуществляется так, как это уже было описано выше.

После точной синхронизации лампочка L гаснет и выключатель Π вручную или автоматически переводится в положение «Вкл.». При этом



Фиг. 11.18. Принципиальная схема устройства для синхронизации генератора при включении на параллельную работу без ручной подрегуливовки скорости вращения.

срабатывает главный контактор, включая генератор в сеть, и отключает реле синхронизации P .

В том случае, когда частота генераторов при всех изменениях нагрузки поддерживается постоянной с большой точностью (1 герц), синхронизация генератора может быть осуществлена более просто. На фиг. 11.19 приведена схема синхронизации с постоянным углом опережения, которая может быть применена в этом случае.

Для включения генератора на шины необходимо замкнуть выключатель Π . При этом к диагонали выпрямителя B подводится напряжение, равное разности напряжений одноименных фаз включаемого генератора и шин. Это напряжение выпрямляется и фильтруется с помощью контура R_1C_1 . Сглаженное напряжение биений U_1 , пропорциональное скольжению генератора, подводится к обмотке реле 1.

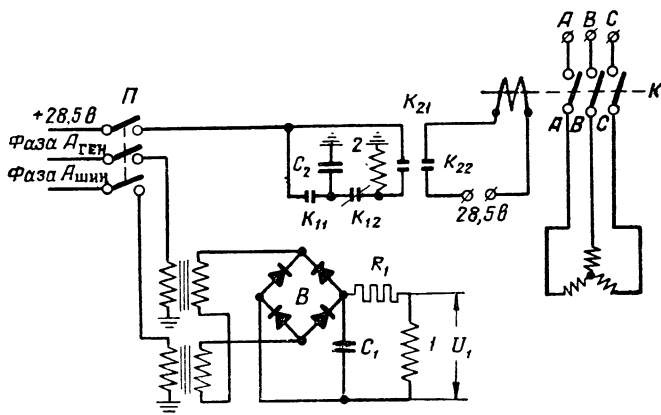
Если при замыкании выключателя Π напряжение U_1 выше напряжения срабатывания реле 1, то реле 1 сработает, контакты K_{11} замкнутся, а контакты K_{12} разомкнутся. При этом конденсатор C_2 зарядится до напряжения 28,5 в. Когда затем напряжение U_1 снизится до величины отпускания реле 1, контакты K_{11} разомкнутся, контакты K_{12} замкнутся и конденсатор C_2 разрядится через обмотку реле 2. Реле 2 срабатывает, самоблокируется контактами K_{21} и замыкает контакты K_{22} , включающие

обмотку главного контактора на напряжение 28,5 в. Главный контактор K срабатывает и включает генератор на сборные шины. Таким образом, включение генератора на сборные шины происходит после отпускания реле 1 через время Δt_3 , равное суммарному времени запаздывания реле 2 и главного контактора генератора.

Угол опережения включения генератора θ_d при этом равен

$$\theta_d = \frac{360}{T_p} \Delta t_3,$$

где T_p — период скольжения.



Фиг. 11. 19. Принципиальная схема устройства для синхронизации генератора с постоянным углом опережения.

При частоте скольжения, близкой к 1 герцу, $f_p = \frac{1}{T_p} \approx 1$ гц, генератор включается почти в момент точного совпадения фаз напряжений включаемого генератора и сборных шин.

Если включение генератора будет производиться при частоте скольжения $\frac{1}{T_p}$, большей 2 гц, то расхождение фаз напряжений включаемого генератора и сборных шин получается большим $|\delta = \theta_r - \theta_{\text{шин}}| > 15^\circ$ и процесс синхронизации будет сопровождаться толчками тока и механическими ударами на валу. Поэтому данная схема синхронизации может быть применена лишь в том случае, когда точность поддержания частоты генераторов лежит в пределах 1—2 гц.

Глава XII

КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ И ЗАЩИТА САМОЛЕТНЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

§ 12.1. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ НА ЗАЖИМАХ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Внезапное короткое замыкание на зажимах синхронной машины, несмотря на свою небольшую продолжительность, представляет очень тяжелый режим как для самой машины, так и для связанных с ней элементов системы передачи и распределения электрической энергии, так как возникающие при этом явления всплески токов могут превосходить номинальные значения более чем в десять раз.

Ниже рассматриваются явления, сопровождающие внезапное трехфазное (симметричное) короткое замыкание на зажимах синхронного генератора.

В целях упрощения анализа и выяснения основных физических явлений предполагается, что перед коротким замыканием генератор работал без нагрузки с некоторым током возбуждения, остающимся постоянным и в дальнейшем.

При внезапном коротком замыкании на зажимах синхронного генератора в цепях статора и ротора возникают электродвижущие силы, обусловленные постоянством потокоцеплений в машине в первый момент времени. В процессе короткого замыкания в цепях статора и ротора действуют следующие мгновенные электродвижущие силы.

В обмотке статора:

а) электродвижущая сила, обусловленная вращением ротора,

$$\sqrt{2}E_0 \sin(\omega t + \varphi);$$

б) электродвижущая сила взаимоиндукции, вызванная изменением тока ротора в процессе короткого замыкания, $M_{я.в} \frac{di_v}{dt}$, где $M_{я.в}$ — взаимная индуктивность фазы статора и обмотки ротора по продольной оси, i_v — ток возбуждения;

в) электродвижущая сила взаимоиндукции, создаваемая изменением тока в успокоительной (демпферной) обмотке в процессе короткого замыкания — $M_{я.д} \frac{di_d}{dt}$, где $M_{я.д}$ — взаимная индуктивность фазы статора и успокоительной обмотки, i_d — ток успокоительной обмотки;

г) электродвижущая сила самоиндукции — $L_{я} \frac{di_{\kappa}}{dt}$, где $L_{я}$ — индуктивность фазы статора по продольной оси, i_{κ} — мгновенный ток короткого замыкания в фазе статора.

В обмотке ротора действуют:

а) приложенное к обмотке возбуждения постоянное напряжение U_B ;
 б) электродвижущая сила взаимоиנדукции, обусловленная изменением тока статора $-M_{B. \sigma} \frac{di_{\sigma}}{dt}$;

в) электродвижущая сила взаимоиנדукции, создаваемая изменением тока в успокоительной обмотке, $-M_{B. \delta} \frac{di_{\delta}}{dt}$, где $M_{B. \delta}$ — взаимная индуктивность обмотки возбуждения и успокоительной обмотки;

г) электродвижущая сила самоиндукции $-L_B \frac{di_B}{dt}$, где L_B — индуктивность обмотки возбуждения.

В цепи успокоительной обмотки наводятся:

а) электродвижущая сила взаимоиנדукции, обусловленная изменением тока статора, $-M_{\delta. \sigma} \frac{di_{\sigma}}{dt}$;

б) электродвижущая сила взаимоиנדукции, вызванная изменением тока возбуждения, $-M_{\delta. B} \frac{di_B}{dt}$;

в) электродвижущая сила самоиндукции, обусловленная изменением тока в успокоительной обмотке, $-L_{\delta} \frac{di_{\delta}}{dt}$, где L_{δ} — индуктивность успокоительной обмотки.

На фиг. 12.1 изображены характерные осциллограммы токов трех фаз статора генератора при внезапном трехфазном коротком замыкании. Как видно из этих осциллограмм, кривая тока короткого замыкания в общем случае может состоять из периодической и

Фиг. 12.1. Осциллограмма тока трехфазного короткого замыкания на зажимах синхронного генератора.

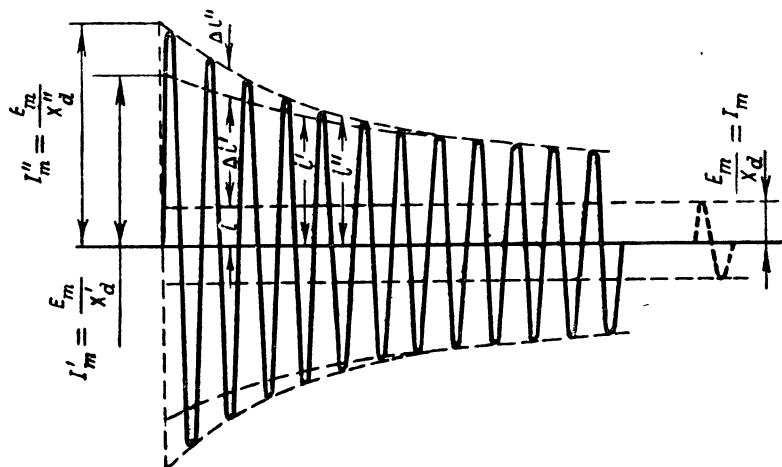
апериодической составляющих. Периодические составляющие всех трех фаз одинаковы по величине и отличаются лишь фазой, апериодические же составляющие в разных фазах различны.

На фиг. 12.2 изображена периодическая составляющая тока короткого замыкания.

Как видно из этой осциллограммы, в начальный момент амплитуда периодической составляющей имеет наибольшее значение. В дальнейшем происходит постепенное уменьшение амплитуды, и спустя длительный промежуток времени после возникновения короткого замыкания, амплитуда периодической составляющей достигает установившейся величины, значительно меньшей начального значения. Соответствующий этому режиму ток носит название установившегося тока короткого замыкания, который на фиг. 12.2 представлен для одного периода (пунктирная линия).

Процесс изменения периодической составляющей тока короткого замыкания, изображенный на осциллограмме (фиг. 12.2), имеет следующее объяснение. Магнитная энергия, запасенная в магнитном поле машины, не может измениться мгновенно. В связи с этим в первый момент короткого замыкания магнитный поток, сцепленный с обмоткой статора,

должен остаться неизменным, неизменной остается и э. д. с. статора. Вследствие того что при коротком замыкании сопротивление цепи статора резко уменьшается, нарушается стационарный режим и ток статора начинает быстро увеличиваться, причем скорость изменения тока статора в моменты времени, непосредственно следующие за коротким замыканием, получается очень большой. Увеличение тока статора вызывает усиление потока реакции статора, стремящегося размагнитить машину. Быстрое изменение тока статора, а следовательно, и потока реакции статора вызывает наведение э. д. с. в цепях ротора (обмотке возбуждения, демпферной обмотке и массиве ротора), создающих значительные экранирующие намагничивающие токи. В результате размагничивающая реакция статора, вызванная увеличивающимся током статора, компенсирует-



Фиг. 12.2. Периодическая составляющая тока короткого замыкания.

ся действием экранирующих намагничивающих токов ротора, и результирующее потокоцепление уменьшается со значительным замедлением, оставаясь в первые моменты времени короткого замыкания равным своей первоначальной величине.

Появившиеся в первый момент после короткого замыкания в цепях ротора свободные намагничивающие токи постепенно затухают, реакция статора сказывается все сильнее и сильнее, что приводит к уменьшению э. д. с. генератора. Этот процесс продолжается до тех пор, пока свободные намагничивающие токи ротора не уменьшатся до нуля и не наступит режим установившегося короткого замыкания. Таким образом, в начальный период короткого замыкания имеют место большие токи как в цепи статора, так и в обмотках ротора.

Свободные токи в цепях ротора имеют различные степени затухания. Быстрее всего затухают свободные токи в демпферной обмотке и замкнутых контурах стального массива ротора, имеющих относительно небольшие постоянные времени. Наиболее медленно свободные токи затухают в цепи обмотки возбуждения, обладающей относительно большой индуктивностью.

В связи с изложенным выше периодическую составляющую тока короткого замыкания разлагают в свою очередь на три составляющие: составляющую установившегося тока короткого замыкания i , свободную переходную периодическую составляющую $\Delta i'$, обусловленную появлением свободных токов в цепи возбуждения ротора, и свободную сверхпереходную периодическую составляющую $\Delta i''$, обусловленную свобод-

ными токами в демпферных цепях и короткозамкнутых контурах стального массива ротора.

Эти свободные переходные составляющие выделены на фиг. 12.2 пунктиром.

Сумма всех трех составляющих периодического тока короткого замыкания, т. е.

$$i'' = i + \Delta i' + \Delta i'', \quad (12.1)$$

называется сверхпереходным током короткого замыкания. Другими словами, сверхпереходным током короткого замыкания называется та величина периодического тока короткого замыкания, которая получилась бы при отсутствии затухания токов в цепях обмотки возбуждения и демпферной обмотки. Сумма первых двух составляющих периодического тока короткого замыкания, т. е.

$$i' = i + \Delta i', \quad (12.2)$$

называется переходным током короткого замыкания. Другими словами, переходным током короткого замыкания называется та величина периодического тока короткого замыкания, которая получилась бы в том случае, если бы демпферные токи затухали, а затухание тока в обмотке возбуждения отсутствовало бы.

Таким образом, сверхпереходный ток короткого замыкания — это периодическая составляющая полного тока короткого замыкания с учетом влияния демпферных свободных токов, а переходный ток короткого замыкания — это периодическая составляющая тока короткого замыкания при неучете влияния демпферных свободных токов. Установившийся же ток короткого замыкания — это периодическая составляющая по окончании всех переходных процессов.

С некоторым приближением можно считать, что изменение амплитуд свободных, переходной и сверхпереходной составляющих происходит по экспоненциальному закону с постоянными времени соответственно T'_d и T''_d . Величины этих постоянных времени определяются отношениями индуктивностей к активным сопротивлениям соответствующих цепей.

Кроме периодической составляющей, ток короткого замыкания имеет также аperiodическую составляющую.

Появление аperiodической составляющей тока короткого замыкания (см. фиг. 12.1, *B* и *C*) происходит по следующей причине.

Цепь статора, включающая в себя также и элементы сети до места короткого замыкания, обладает некоторой индуктивностью, состоящей из индуктивности рассеяния обмоток статора, индуктивности проводов и пр. Вследствие этого скачкообразное изменение тока в момент короткого замыкания в этой цепи невозможно, хотя при коротком замыкании может иметь место скачкообразное изменение параметров цепи статора (сопротивление цепи резко уменьшается). Изменение параметров цепи (R и L) вызывает переходный процесс. Величина аperiodической составляющей зависит от момента короткого замыкания и может быть различной для каждой из трех фаз (см. фиг. 12.1, фазы *A*, *B* и *C*). Если в момент короткого замыкания в какой-либо фазе имело место нулевое значение напряжения переменного тока, то и аperiodическая составляющая для данной фазы также равна нулю.

Итак, ток статора генератора при симметричном коротком замыкании можно разложить на четыре составляющих:

- 1) установившийся ток короткого замыкания i ;
- 2) свободную переходную периодическую составляющую $\Delta i'$;
- 3) свободную сверхпереходную периодическую составляющую $\Delta i''$;
- 4) аperiodическую составляющую.

Сумма трех первых составляющих дает периодический сверхпереходный ток. Сумма периодического и аperiodического токов дает полный ток короткого замыкания.

Если не учитывать активные сопротивления, действие регуляторов напряжения и насыщение магнитной цепи, то действующее значение установившегося тока короткого замыкания для генератора с неявно выраженными полюсами ротора может быть определено по формуле

$$I = \frac{E}{x_d}, \quad (12.3)$$

где E — э. д. с., равная напряжению холостого хода генератора, имевшему место до короткого замыкания;

x_d — синхронный реактанс генератора.

Установившийся ток короткого замыкания, определяемый формулой (12.3), в большинстве случаев не является опасным для генераторов, так как значение его невелико вследствие большой величины синхронного реактанта.

Начальное значение переходного тока короткого замыкания может быть определено по формуле, аналогичной формуле для установившегося тока короткого замыкания:

$$I' = \frac{E}{x_d'}, \quad (12.4)$$

где x_d' — так называемый переходный реактанс генератора.

Обычно величина переходного реактанта генератора в несколько раз меньше синхронного реактанта, вследствие чего начальное значение переходного тока короткого замыкания может в несколько раз превышать установившийся ток короткого замыкания.

Начальное значение сверхпереходного тока короткого замыкания определяют по формуле

$$I'' = \frac{E}{x_d''}, \quad (12.5)$$

где x_d'' — так называемый сверхпереходный реактанс генератора.

Величина его еще меньше, чем величина переходного реактанта. В связи с этим начальное значение сверхпереходного тока больше начального значения переходного тока короткого замыкания.

Сверхпереходный ток может вызвать недопустимый нагрев генератора, вследствие чего его необходимо учитывать при оценке теплового режима, сопровождающего короткое замыкание. Величина этого тока определяет также разрывную мощность выключателей, предназначенных для отключения генератора при коротком замыкании.

Максимальное значение тока короткого замыкания с учетом самого неблагоприятного случая наложения аperiodической составляющей (когда короткое замыкание происходит при прохождении периодической составляющей через максимальное значение) при отсутствии затухания должно быть равно удвоенному сверхпереходному току. Однако необходимо учитывать затухание периодического тока короткого замыкания. Это затухание обычно учитывается так называемым ударным коэффициентом, равным 0,8. С учетом этого коэффициента максимальное мгновенное значение тока короткого замыкания получается равным

$$i_y = 1,8 \sqrt{2} I'', \quad (12.6)$$

где i_y — максимальное мгновенное значение тока короткого замыкания, называемое ударным током короткого замыкания.

Несимметричные короткие замыкания могут быть рассчитаны методом симметричных составляющих. Ниже приводятся формулы для подсчета начальных значений периодической составляющей тока несимметричных коротких замыканий.

При двухфазном коротком замыкании генератора, работающего в режиме холостого хода, начальное значение сверхпереходного тока короткого замыкания определяется по формуле

$$I''_{(2)} = \frac{\sqrt{3}E}{x'_d + x_2}, \quad (12.7)$$

где x_2 — реактанс обратной последовательности.

Начальное значение переходного тока короткого замыкания может быть подсчитано по формуле

$$I'_{(2)} = \frac{\sqrt{3}E}{x'_d + x_2}, \quad (12.8)$$

и установившийся ток короткого замыкания

$$I_{(2)\infty} = \frac{\sqrt{3}E}{x_d + x_2}. \quad (12.9)$$

При однофазном коротком замыкании расчетные формулы принимают вид

$$I''_{(1)} = \frac{3E}{x'_d + x_2 + x_0}, \quad (12.10)$$

$$I'_{(1)} = \frac{3E}{x'_d + x_2 + x_0}, \quad (12.11)$$

$$I_{(1)\infty} = \frac{3E}{x_d + x_2 + x_0}, \quad (12.12)$$

где x_0 — реактанс нулевой последовательности.

Последние соотношения показывают, что ток однофазного короткого замыкания может значительно превосходить соответствующие токи двухфазного и трехфазного коротких замыканий, так как

$$x_d > x_2 \gg x_0.$$

Трехфазные синхронные генераторы, предназначенные для установки на самолетах, имеют соединение фаз статора в звезду с нулевой точкой, соединенной с металлической массой самолета (в качестве нулевого провода используется корпус самолета).

Учитывая эту особенность самолетных синхронных генераторов и их сравнительно небольшую (по сравнению с промышленными) мощность, наибольший интерес представляют два основных вида защиты синхронных генераторов:

1) защита от коротких замыканий во внешней цепи генератора и от токов, вызванных недопустимыми перегрузками; такая защита называется максимально-токовой;

2) защита от внутренних многофазных и однофазных замыканий на корпус, для осуществления которой используется продольная дифференциальная защита.

Отключение синхронного генератора от сети не ликвидирует возникшее в нем повреждение. Магнитное поле ротора и э.д.с. в обмотках статора могут в течение длительного времени иметь достаточную величину для поддержания электрической дуги и ее разрушающего действия

в месте повреждения. Поэтому для прекращения развития повреждения синхронного генератора одновременно с отключением его от сети вводится в действие специальное устройство, называемое автоматом гашения поля, задачей которого является быстрая ликвидация магнитного поля ротора для снижения э. д. с., развиваемой в обмотках статора генератора.

Максимальная и дифференциальная защиты генераторов выполняются с помощью реле, поэтому эти защиты носят название релейных.

§ 12.2. МАКСИМАЛЬНО-ТОКОВАЯ РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Максимально-токовая защита служит для отключения генератора от сети при коротком замыкании на его шинах или фидере и для сигнализации о недопустимых перегрузках генератора.

Для обеспечения селективности действия максимально-токовая защита генератора должна иметь выдержку времени. Выдержка времени максимально-токовой защиты может быть зависимой и независимой от тока, протекающего через реле.

При независимой выдержке времени максимальной токовой защиты время действия защиты не зависит от величины этого тока и устанавливается при помощи реле времени. При зависимой выдержке времени время действия защиты уменьшается при увеличении тока, протекающего через реле.

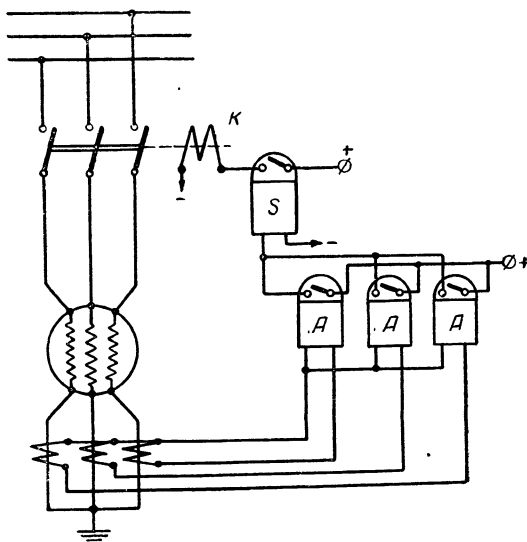
Зависимая выдержка времени осуществляется обычно с помощью индукционных или тепловых реле.

На фиг. 12.3 изображена схема максимальной защиты синхронного генератора с независимой выдержкой времени, а на фиг. 12.4 — схема максимальной защиты с зависимой выдержкой времени.

Как видно из фиг. 12.3, в каждой фазе синхронного генератора имеется трансформатор тока: вторичные обмотки этих трансформаторов включаются на электромагнитные максимальные реле A мгновенного действия. Контакты максимальных реле, включенные параллельно, управляют реле времени S , выдержка времени которого осуществляется с помощью находящегося в реле часового механизма и может регулироваться в широких пределах.

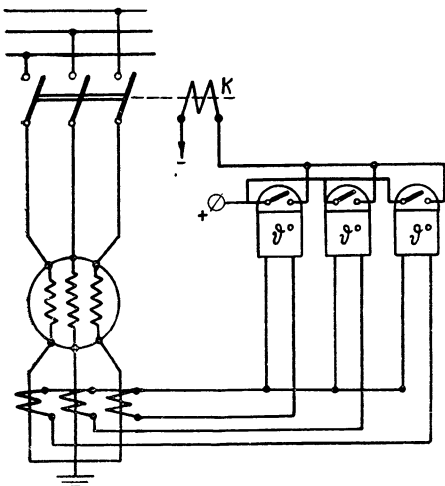
Выдержка времени защиты генератора должна быть больше максимальных выдержек времени защит всех других элементов сети, отходящих от генераторных шин, вследствие чего она получается довольно значительной.

Контакты реле времени управляют трехфазным контактором K , через контакты которого синхронный генератор подключен к сети. При протекании тока короткого замыкания в какой-либо фазе синхронного генератора практически мгновенно срабатывает соответствующее максималь-



Фиг. 12.3. Схема максимальной защиты синхронного генератора с независимой выдержкой времени.

ное реле и включает реле времени S . Через время, равное времени выдержки реле S , оно срабатывает и, замкнув свои контакты, посылает импульс на отключение синхронного генератора от сети. Если продолжительность протекания тока короткого замыкания в фазах синхронного генератора меньше выдержки времени реле S (например, короткое замыкание произошло в питательной или распределительной сети и отключено соответствующей защитой), то максимальные реле размыкают свои контакты, реле времени отключается и возвращается в исходное положение, не успев сработать и отключить синхронный генератор. Трансформаторы тока для максимальной токовой защиты должны быть установлены между нулевой точкой генератора и началом его статорной обмотки, как это изображено на фиг. 12.3, так как если установить их между обмотками генератора и шинами, то защита не будет действовать при междофазных замыканиях на зажимах генератора, если генератор работает на шины один.



Фиг. 12.4. Схема максимальной защиты синхронного генератора с зависимой выдержкой времени.

В самолетных условиях независимая выдержка времени в максимальной защите неприемлема, так как такая защита не учитывает действительного теплового состояния генератора.

В отличие от промышленных синхронных генераторов на тепловое состояние самолетных синхронных генераторов влияет весьма большое количество факторов. Самолетные синхронные генераторы работают в условиях значительных изменений температуры и плотности атмосферного воздуха, подвержены воздействию резко несимметричных нагрузок и имеют значительно более высокие рабочие температуры, чем промышленные синхронные генераторы. Поэтому максимальная токовая защита самолетных генераторов долж-

на выполняться так, чтобы реагировать на действительное тепловое состояние синхронного генератора. Этому требованию частично удовлетворяет максимальная токовая защита с зависимой выдержкой времени.

Схема максимальной защиты с зависимой выдержкой времени, изображенная на фиг. 12.4, не имеет реле времени и осуществляется при помощи тепловых токовых реле ϑ° , включенных в фазы синхронного генератора.

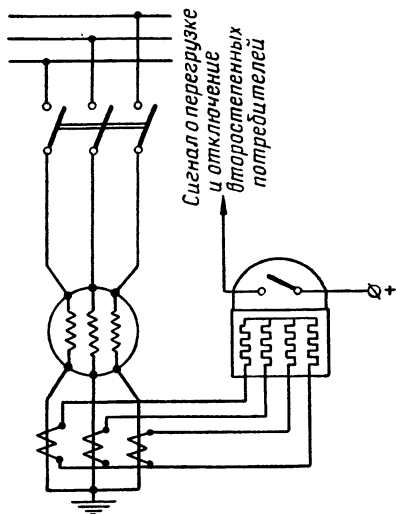
Чем больший ток протекает в фазах синхронного генератора, тем быстрее замыкают свои контакты тепловые токовые реле и дают импульс на отключение генератора. Однако в самолетных условиях генератор должен отключаться максимальной защитой лишь в самых крайних случаях, когда происходит действительно короткое замыкание.

В том случае, если генератор сильно перегружен, защита не должна отключать его от сети и, таким образом, перегружать другие генераторы, а должна действовать на сигнал о перегрузке или отключать менее ответственные потребители.

С другой стороны, выше указывалось, что величина тока перегрузки не может служить критерием теплового состояния генератора. Поэтому

более рациональной схемой максимальной токовой защиты самолетных синхронных генераторов является схема, изображенная на фиг. 12.5.

Здесь в качестве чувствительного элемента защиты используется суммирующее термореле. Обогревательные элементы термореле, соединенные в звезду, питаются вторичными токами трансформаторов тока, установленных в каждой фазе генератора. Кроме того, имеется еще один обогревательный элемент, включенный в нулевой провод вторичных обмоток трансформаторов тока. При такой схеме включения обогревательных элементов зависимость результирующего нагрева термореле от перегрузки является более близкой к зависимости нагрева синхронного генератора от перегрузки, так как термореле является приблизительно тепловой моделью последнего. Если, кроме того, термореле расположить в выходном потоке охлаждающего генератор воздуха, то такая защита будет учитывать также и предшествующее перегрузке тепловое состояние генератора. Защита действует, как это видно из фиг. 12.5, на сигнал и отключение второстепенных потребителей.



Фиг. 12.5. Схема максимальной защиты синхронного генератора с суммирующим термореле.

Короткие замыкания за фидером генератора в этом случае должны отключаться защитами магистральной и распределительной сетей самолета. При коротких замыканиях в самом генераторе действует продольная дифференциальная токовая защита.

§ 12.3. РЕЛЕЙНАЯ ПРОДОЛЬНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ТОКОВАЯ ЗАЩИТА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Весьма опасным видом повреждения синхронного генератора является нарушение изоляции обмоток статора и, как следствие этого, внутренние межфазные замыкания обмоток статора и замыкание этих обмоток на корпус.

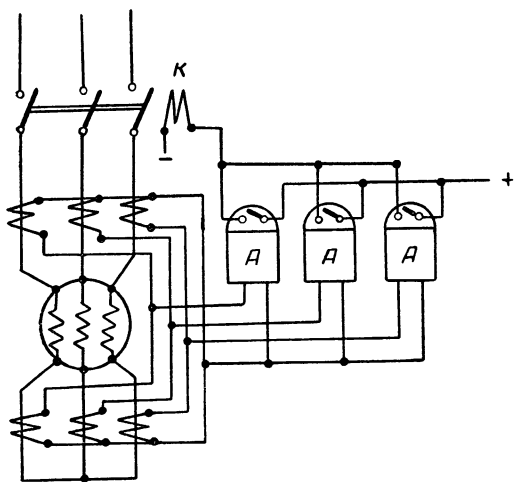
При наличии этих повреждений для предотвращения их развития синхронный генератор необходимо по возможности мгновенно отключить от сети. Для этого синхронные генераторы оборудуются чувствительной и быстродействующей продольной дифференциальной защитой. На фиг. 12.6 изображена схема такой продольной дифференциальной защиты синхронного генератора.

Как видно из фиг. 12.6, последовательно в каждую из фаз синхронного генератора включены два трансформатора тока: первый по одну сторону обмотки статора, второй — по другую.

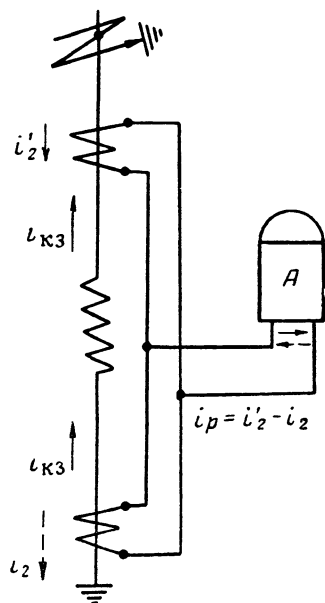
Вторичные обмотки трансформаторов тока одной и той же фазы включены так, чтобы в максимальных токовых реле А, включенных параллельно вторичным обмоткам трансформаторов, протекала разность вторичных токов этих трансформаторов. Если трансформаторы тока совершенно идентичны, то при одинаковых токах в первичных цепях трансформаторов тока, включенных в одну фазу, ток в соответствующем максимальном реле равен нулю.

Если короткое замыкание происходит за трансформаторами тока (сквозное короткое замыкание вне зоны защиты, фиг. 12.7), то соответ-

ствующее максимальное реле не срабатывает, так как по первичным обмоткам соответствующих трансформаторов тока протекает один и тот же ток короткого замыкания. Иная картина получается при коротких замыканиях в зоне между трансформаторами тока (в зоне защиты, фиг. 12.8). Токи вторичных обмоток трансформаторов тока одноименной фазы, протекающие в максимальном реле, уже не вычитаются, а складываются, так как фаза тока в одном из трансформаторов тока меняется в этом случае на 180° (фиг. 12.8). В результате этого срабатывает соответствующее максимальное реле и синхронный генератор практически мгновенно отключается от сети. Дифференциальная защита синхронного генератора позволяет защи-



Фиг. 12.6. Схема продольной дифференциальной защиты синхронного генератора.



Фиг. 12.7. Распределение токов во вторичных обмотках трансформаторов тока при коротком замыкании вне зоны защиты.

тить генератор от внутренних повреждений (замыкание между витками разноименных фаз и замыкания фаз на корпус), в чем нетрудно убедиться, рассмотрев распределение токов короткого замыкания в этих случаях.

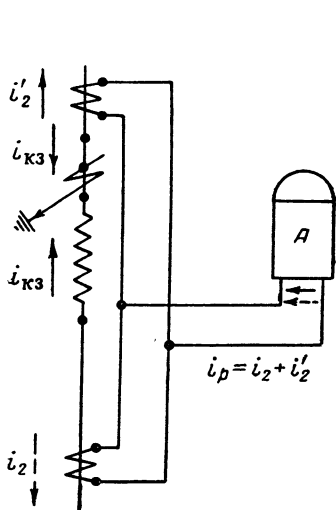
В действительности, несмотря на однотипность применяемых трансформаторов тока, всегда имеется некоторая разность между вторичными токами i_2 и i_2' трансформаторов тока одноименных фаз, если в этих фазах протекают одинаковые токи. Эта разность вторичных токов вследствие неодинаковости характеристик трансформаторов тока называется током небаланса.

Ток небаланса при сквозных коротких замыканиях может достигать больших значений и приводить к неправильному действию защиты. Для уменьшения величины тока небаланса можно использовать продольную дифференциальную защиту с суммированием первичных ампервитков, изображенную на фиг. 12.9.

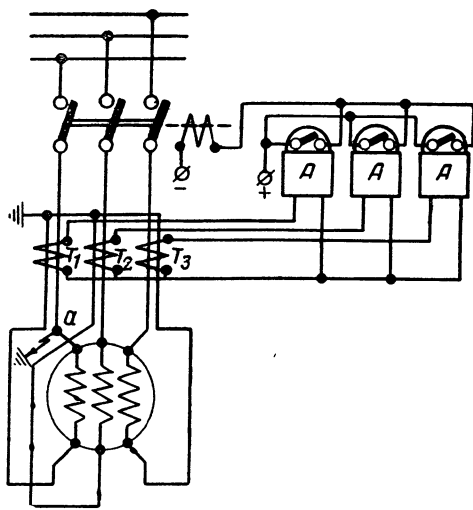
Трансформаторы тока T_1 , T_2 и T_3 , изображенные на фиг. 12.9, имеют по две одинаковые первичные обмотки, из которых одна включается между нулем и концом фазовой обмотки генератора, а другая—между началом фазовой обмотки и сетью. Вторичные обмотки этих трансформаторов, соединенные в звезду, включены на соответствующие токовые реле мгновенного действия. При всяких коротких замыканиях вне зоны защиты

первичные токи в начале и в конце обмоток соответственно равны, вторичные токи равны нулю и защита не действует.

Если короткое замыкание происходит в зоне защиты (например, в точке a), то равенства первичных токов в начале и в конце обмотки соответствующей фазы не будет, в трансформаторе T_1 появляется вторич-



Фиг. 12.8. Распределение токов во вторичных обмотках трансформаторов тока при коротком замыкании в зоне действия защиты.



Фиг. 12.9. Схема продольной дифференциальной защиты синхронного генератора с суммированием первичных ампервитков.

ный ток, который вызывает срабатывание реле A , и генератор быстро отключается от сети. Схема дифференциальной защиты самолетного синхронного генератора, изображенная на фиг. 12.9, по сравнению со схемой дифференциальной защиты, изображенной на фиг. 12.6, обладает также тем преимуществом, что обрывы во вторичных цепях трансформаторов тока не приводят к ложному срабатыванию защиты, чего нельзя сказать относительно схемы, изображенной на фиг. 12.6.

§ 12.4. АВТОМАТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ГАШЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ГЕНЕРАТОРОВ

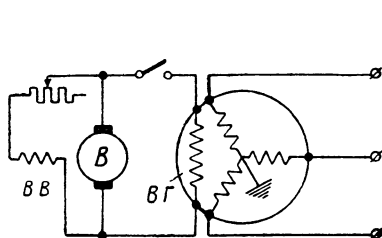
При отключении поврежденного генератора от сети прекращается питание места короткого замыкания от остальных генераторов, включенных в сеть. Однако ротор отключенного генератора продолжает вращаться, и при наличии возбуждения э. д. с., наводимые в обмотках статора, могут вызвать недопустимые токи в месте повреждения. Поэтому на генераторах устанавливаются специальные автоматические устройства, позволяющие быстро развозбудить машину.

Эти устройства должны обеспечивать быстрое снижение напряжения на генераторе до величины, неспособной поддерживать электрическую дугу в месте повреждения. Для этого необходимо поглотить магнитную энергию поля возбуждения генератора, которая благодаря большой индуктивности обмотки возбуждения достигает значительной величины:

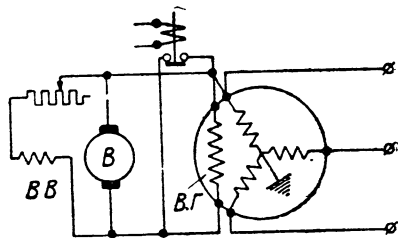
$$A = \frac{L_B i_B^2}{2}.$$

Поглощение магнитной энергии в применяемых схемах производится превращением ее в тепло, выделяемое в сопротивлениях обмоток генератора или дополнительно вводимых в цепи возбуждения реостатов.

Наиболее простым способом гашения поля является разрыв цепи возбуждения генератора (фиг. 12.10). Однако при этом возникают перенапряжения и образуется электрическая дуга на контактах, разрывающих цепь возбуждения генератора.



Фиг. 12.10. Принципиальная схема гашения поля синхронного генератора посредством разрыва его цепи возбуждения.

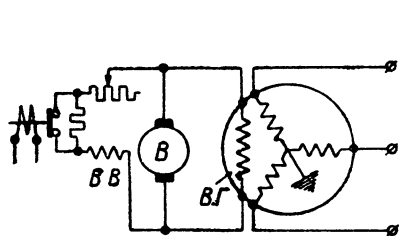


Фиг. 12.11. Принципиальная схема гашения поля синхронного генератора посредством короткого замыкания его обмотки возбуждения.

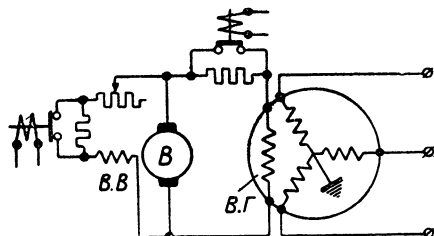
Вследствие этого процесс гашения магнитного поля возбуждения затягивается, а контакты выключателя поля возбуждения находятся в очень тяжелых условиях работы.

Другим способом гашения поля возбуждения генератора является короткое замыкание его обмотки возбуждения $B\Gamma$ (фиг. 12.11). Перенапряжение здесь не возникает, однако здесь вследствие малого активного сопротивления $R_{B\Gamma}$ обмотки возбуждения и большой индуктивности ее имеет место замедленное спадание тока возбуждения (большая постоянная времени обмотки возбуждения $T_{B\Gamma} = \frac{L_{B\Gamma}}{R_{B\Gamma}}$).

Весьма простым способом гашения поля возбуждения генератора является введение в цепь возбуждения возбуждителя добавочного актив-



Фиг. 12.12. Принципиальная схема гашения поля синхронного генератора посредством введения сопротивления в цепь возбуждения возбуждителя.



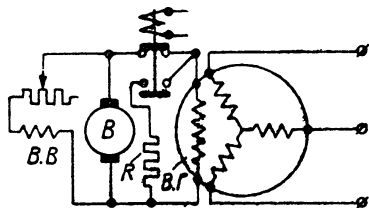
Фиг. 12.13. Принципиальная схема гашения поля синхронного генератора посредством введения сопротивления в цепь возбуждения генератора и возбуждителя.

ного сопротивления (фиг. 12.12). Недостатком этого способа гашения поля возбуждения является значительное время гашения благодаря небольшой величине активного сопротивления главной цепи возбуждения и большой индуктивности ее.

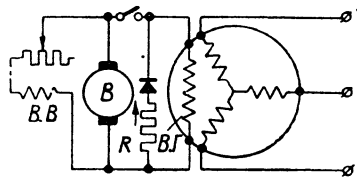
Если, помимо включения сопротивления в цепь возбуждения возбуждителя, одновременно включить также сопротивление в цепь возбуждения генератора (фиг. 12.13), то процесс гашения поля возбуждения ге-

нератора происходит значительно быстрее, так как постоянная времени главной цепи возбуждения значительно уменьшается.

Наиболее эффективным способом гашения поля возбуждения генератора является переключение обмотки возбуждения генератора на сопротивление с последующим ее отсоединением от возбудителя (фиг. 12.14). Чтобы не возникли недопустимые перенапряжения, переключение производится без разрыва цепи возбуждения генератора с помощью специального контактора. Сопротивление R выбирается по возможности большим в пределах допустимых перенапряжений, могущих



Фиг. 12.14. Принципиальная схема гашения поля синхронного генератора посредством переключения его обмотки возбуждения.



Фиг. 12.15. Принципиальная схема гашения поля синхронного генератора с применением выпрямителя.

возникнуть при его включении. Достоинством этой схемы является то, что остаточное напряжение на зажимах генератора определяется лишь остаточным намагничиванием полюсов ротора генератора, так как возбудитель отключается.

На фиг. 12.15 изображена принципиальная схема гашения поля синхронного генератора с применением выпрямителя, предложенная А. Н. Ларионовым. При размыкании контактов выключателя обмотка возбуждения оказывается замкнутой на сопротивление R , и через выпрямитель в этой цепи протекает ток, поддерживаемый э. д. с. самоиндукции обмотки возбуждения. Преимуществом этой схемы по сравнению с предыдущей является возможность применения простого выключателя вместо сложного, который необходим в схеме, изображенной на фиг. 12.14.

Глава XIII

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ И РОДА ТОКА

На большинстве современных самолетов, кроме электрооборудования, питание которого осуществляется от бортовой сети самолета тем же родом тока и при том же уровне напряжения, что и генерирование и распределение электрической энергии, имеются также различные установки, приборы и двигатели, для питания которых требуются род тока и уровень напряжения, отличные от основного.

На самолетах с основной системой энергоснабжения постоянного тока напряжения 27 в имеются установки, которые требуют снабжения постоянным током повышенного напряжения и применения переменного тока. Так, например, для питания анодных цепей самолетных радиоприборов требуется постоянный ток напряжения от 120 до 3000 в.

Повышенное напряжение требуется иногда для питания электродвигателей с целью увеличения начальных пусковых моментов.

В некоторых случаях приходится применять постоянный ток с широкой регулировкой напряжения для регулирования скорости вращения электродвигателей. Приходится также использовать специальные генераторы, обеспечивающие возможность изменения полярности на их зажимах и широкую регулировку напряжения для управления специальными установками электропривода.

Многие следящие системы, дистанционные передачи показаний, усилительные устройства, устанавливаемые на самолетах, питаются переменным током.

Для достижения больших скоростей вращения ротора в гироскопических приборах используются асинхронные и синхронные двигатели, питание которых осуществляется от источников переменного тока повышенной частоты.

Эти примеры наглядно показывают, что наряду с основным видом электрической энергии (в данном случае постоянным током) на самолетах должны быть установлены дополнительные источники как постоянного, так и переменного тока.

На самолетах с системами энергоснабжения переменного тока возникает необходимость иметь как различные уровни напряжения переменного тока, так и постоянный ток низкого и высокого напряжения.

В большинстве случаев электрическая энергия, отличающаяся от основной, получается путем преобразования основного вида энергии.

Самолетные преобразователи энергии можно разделить на четыре основные группы: преобразователи постоянного тока низкого напряжения в постоянный ток повышенного напряжения; преобразователи постоянного тока в переменный; преобразователи переменного тока в постоянный; трансформаторы.

В ряде случаев используются преобразователи, которые осуществляют одновременно два преобразования: преобразование постоянного тока низкого напряжения в постоянный ток повышенного напряжения и в переменный ток.

§ 13.1. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ПОСТОЯННЫЙ ТОК ПОВЫШЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Для преобразования постоянного тока низкого напряжения в постоянный ток повышенного напряжения на самолетах нашли преимущественное применение вращающиеся одноякорные преобразователи (умформеры), которые используются главным образом для питания анодных и сеточных цепей радиоустройств.

В силу этого к преобразованному напряжению предъявляются особенно жесткие требования в отношении постоянства величины напряжения и его формы, так как наличие гармонических составляющих вызывает существенное увеличение уровня помех радиоприему.

В соответствии с установившейся классификацией электрических машин умформеры относятся к машинам типа одноякорного преобразователя и представляют собой комбинацию генератора и электродвигателя в одной машине.

Обособленные обмотки якоря умформера низкого и высокого напряжения заложены в одни и те же пазы и подведены соответственно к коллекторам низкого и высокого напряжения.

Магнитная система обмоток низкого и высокого напряжения общая и возбуждается параллельной обмоткой (иногда используется смешанное возбуждение), подключаемой прямо к щеткам низкого напряжения, а в отдельных случаях один конец обмотки возбуждения выводится наружу и присоединяется к бортовой сети, минуя специальное добавочное сопротивление, которое включается в цепь якоря для уменьшения броска тока при пуске умформера в ход.

Таким образом, если рассматривать умформер со стороны низкого напряжения, то он представляет собой двигатель постоянного тока параллельного или смешанного возбуждения. Со стороны высокого напряжения умформер представляет собой генератор с независимым возбуждением.

Соотношение между э. д. с., наводимыми в якорных обмотках, определяют исходя из основного уравнения электрической машины

$$E_1 : E_2 = \frac{p}{a_1} \frac{n}{60} N_1 \Phi_{\text{я}} : \frac{p}{a_2} \frac{n}{60} N_2 \Phi_{\text{я}} = \frac{N_1}{a_1} : \frac{N_2}{a_2},$$

где E_1 и E_2 — э. д. с. соответствующих обмоток якоря;

a_1 и a_2 — числа пар параллельных ветвей соответствующих обмоток якоря;

N_1 и N_2 — числа активных проводников обмоток якоря;

p — число пар полюсов;

$\Phi_{\text{я}}$ — общий магнитный поток якоря машины.

В одноякорных преобразователях магнитный поток мало изменяется с изменением нагрузки. Это объясняется тем, что реакция якоря весьма незначительна и почти не сказывается на рабочем процессе.

Действительно, в обмотке высшего напряжения э. д. с. E_2 и ток I_2 имеют одинаковые направления, а в обмотке низшего напряжения E_1 и I_1 имеют противоположные направления. Так как э. д. с. E_1 и E_2 направлены одинаково, то токи, протекающие в обмотках преобразователя, имеют

различные направления, вследствие чего поля реакции якоря, создаваемые этими токами, в значительной мере компенсируют друг друга, и основной магнитный поток $\Phi_{\text{я}}$ остается величиной, примерно постоянной.

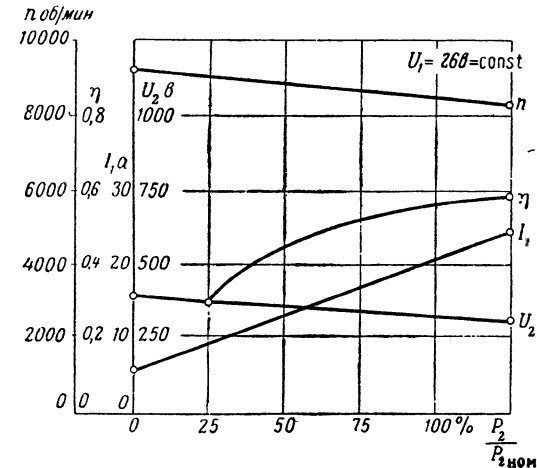
Так как обмотки якоря низшего и высшего напряжения имеют общую магнитную систему, то изменение величины вторичного напряжения путем изменения тока в обмотке возбуждения такого преобразователя невозможно.

Из рабочих характеристик умформера (фиг. 13.1), т. е. зависимости вторичного напряжения U_2 первичного тока I_1 , скорости вращения n и к. п. д. η от нагрузки умформера I_2 или P_2 при постоянном напряжении питания U_1 , видно, что в умформерах обычной конструкции изменение выходного напряжения при изменении нагрузки от номинальной до нуля может достигать 12—15%.

При изменении напряжения питания U_1 вторичное напряжение U_2 также меняется в широких пределах.

К. п. д. умформеров не превышает 0,3—0,5.

Самолетные преобразователи представляют собой полностью экранированные самовентилируемые машины, из которых некоторые снабжаются высокочастотными и низкочастотными фильтрами для защиты от радиопомех и сглаживания кривой высокого напряжения. Располагаются эти фильтры обычно в специальной алюминиевой коробке, находящейся под преобразователем.



Фиг. 13.1. Рабочие характеристики умформера.

Отечественной промышленностью выпускаются двух- и трехколлекторные умформеры. От умформеров первого типа можно получить только одно значение высокого напряжения, от второго типа — два или три напряжения. Трехколлекторный умформер имеет две обмотки высокого напряжения. Коллекторы, на которые выведены эти обмотки, соединены между собой каскадно, а обмотки оказываются соединенными друг с другом через коллекторы последовательно. Это позволяет получить от трехколлекторных преобразователей напряжение, равное как напряжению на каждом из коллекторов, так и сумме их.

Вследствие того что регулировать напряжение умформера обычной конструкции нельзя, иногда на остовах машины, рядом с основными полюсами, устанавливают дополнительную систему полюсов обратной полярности, цепь обмотки возбуждения которых питается от бортовой сети через последовательно включенный регулятор поля (например, угольный столбик регулятора).

На валу машины, рядом с основным якорем, укреплен дополнительный якорь. Обмотка низкого напряжения располагается как в пазах основного, так и дополнительного якорей, в то время как обмотки высокого напряжения размещаются только в основном якоре и э. д. с. в них индуцируется потоком только основных полюсов.

Для первичной обмотки, играющей роль обмотки двигателя, можно написать

$$U_1 = E_1 + I_1 r_1,$$

$$E_1 = \frac{p}{a_1} \frac{n}{60} N_1 \Phi_{\text{я}} (1 - \beta),$$

где U_1 — напряжение, подводимое к умформеру;

I_1 и r_1 — ток и сопротивление первичной обмотки;

β — коэффициент, учитывающий влияние обмотки возбуждения вспомогательных полюсов.

Для вторичной обмотки (генераторной) напряжение на нагрузке

$$U_2 = E_2 - I_2 r_2,$$

$$E_2 = \frac{p}{a_2} \frac{n}{60} N_2 \Phi_{\text{я}},$$

где I_2 и r_2 — ток и сопротивление вторичной обмотки.

Так как $\frac{E_2}{E_1} = \frac{k_{\tau}}{1 - \beta},$

где $k_{\tau} = \frac{N_2}{a_2} : \frac{N_1}{a_1}$ — коэффициент трансформации,

то

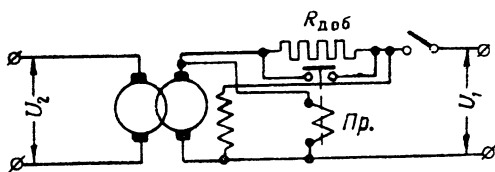
$$U_2 = \frac{k_{\tau}}{1 - \beta} (U_1 - I_1 r_1) - I_2 r_2.$$

Изменяя ток возбуждения в обмотке вспомогательных полюсов, т. е. изменяя величину β , очевидно, можно поддерживать напряжение на нагрузке умформера постоянным при изменении напряжения бортовой сети U_1 и тока нагрузки умформера I_2 .

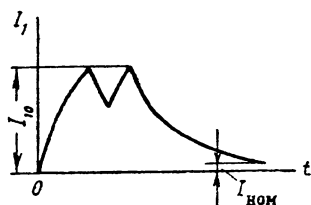
При пуске в ход преобразователь (умформер) ведет себя так же, как и электродвигатель постоянного тока. Пик пускового тока нередко в 8—10 раз больше величины тока, потребляемого преобразователем при нормальной работе. Значительная величина пускового тока усложняет защиту умформеров и участков электрической сети, от которой он питается, от коротких замыканий и перегрузок, а также затрудняет работу источников электрической энергии. Особенно неблагоприятны условия запуска преобразователей при низких температурах, когда загустевает смазка в подшипниках, так как момент трогания и время запуска при этом значительно увеличиваются. Это может вызвать местный перегрев и повреждение изоляции обмотки якоря, в лучшем случае срабатывание защиты. Поэтому при эксплуатации преобразователя особое внимание следует обращать на качество смазки и соответствие ее марок тем, которые рекомендуются заводом-изготовителем как незамерзающие.

Для уменьшения величины пускового тока при запуске мощных преобразователей применяется ступенчатый запуск.

Для осуществления ступенчатого запуска, принципиальная схема которого изображена на фиг. 13.2, конец параллельной обмотки возбуждения выводится отдельно. В цепь якоря на время пуска включается пусковое сопротивление R_d , которое затем при нормальной работе выводится. При ступенчатом запуске зависимость $I_1 = f(t)$ имеет вид, изображенный на фиг. 13.3. Выключается добавочное сопротивление обычно автоматически при помощи реле ПР, срабатывающего при достижении противоэлектродвижущей силы определенного значения, выбираемого с таким расчетом, чтобы второй бросок тока был равен первому I_{10} . На пуск умформера существенное влияние оказывает состояние коллектора и щеток; плохой контакт между коллектором и щетками вызывает большое падение напряжения при пуске, вследствие чего увеличивается время запуска, а иногда пуск преобразователя делается совсем невозможным.



Фиг. 13.2. Схема запуска умформера.



Фиг. 13.3. Изменения тока первичной цепи умформера при запуске по схеме фиг. 13.2.

Аналогичными особенностями обладает запуск вращающихся преобразователей постоянного тока в переменный, которые рассматриваются в следующем параграфе.

§ 13.2. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ПЕРЕМЕННЫЙ

Для преобразования постоянного тока в переменный на самолете в большинстве случаев применяются различные типы вращающихся преобразователей (инвертеров), которые представляют собой всевозможные комбинации из двигателя постоянного тока и генератора переменного тока. Чаще всего постоянный ток низкого напряжения 27 в преобразуется в переменный ток с частотой 400 гц при напряжениях 26; 115 и 120/208 в. На некоторых самолетах каждый потребитель имеет свой преобразователь тока. В отдельных случаях устанавливаются централизованные преобразователи для снабжения переменным током отдельных групп потребителей.

До последнего времени на самолетах применялось большое число вращающихся преобразователей сравнительно небольших мощностей (от 45 до 1500 вт). Количество таких преобразователей на отдельных самолетах доходило до 8—12 и даже больше. В последнее время наметилась тенденция к сокращению числа маломощных преобразователей постоянного тока в переменный и установке одного или двух более мощных, от которых осуществляется централизованное питание потребителей переменного тока. Такое централизованное снабжение потребителей переменным током в ряде случаев оказывается более экономичным, надежным и позволяет уменьшить общий вес преобразователей, устанавливаемых на самолете.

В зависимости от условий работы и назначения к самолетным преобразователям предъявляются определенные требования в отношении постоянства или пределов максимально допустимых колебаний вторичных напряжений и частоты, обусловливаемых изменением нагрузки и напряжения сети постоянного тока.

В ряде случаев максимальные отклонения вторичного напряжения и частоты ограничиваются 1—2% от номинальных значений; для ряда потребителей допустимы значительно большие пределы (до $\pm 10\%$) отклонений от номинальных значений. Для некоторых потребителей особое значение имеет форма кривой напряжения, которая должна быть возможно более близкой к синусоиде.

Самолетные преобразователи в соответствии с общими требованиями к самолетному оборудованию должны быть надежны в эксплуатации, иметь малый вес и габариты при достаточно высоком к. п. д.

Преобразователи должны нормально запускаться под нагрузкой, а при внезапном сбросе части нагрузки процентное повышение напряжения

не должно превышать норм, установленных для каждого конкретного случая.

В целях поддержания постоянства напряжения и частоты преобразователи иногда снабжаются автоматическими регуляторами напряжения и частоты.

Применяемые на самолетах вращающиеся преобразователи постоянного тока в переменный ток повышенной частоты можно классифицировать следующим образом:

- 1) двигатель-генераторные агрегаты;
- 2) преобразователи индукторного типа;
- 3) одноякорные преобразователи с вращающимися обмотками постоянного и переменного тока;
- 4) каскадные преобразователи.

Последние три типа преобразователей получили меньшее распространение вследствие трудностей, связанных с регулированием напряжения переменного тока.

Наибольшее распространение на самолетах получили преобразователи двигатель-генераторного типа. Эти преобразователи представляют собой две самостоятельные электрические машины, сидящие на одном валу: двигатель постоянного тока и генератор переменного тока.

В качестве двигателей используются четырех- или шестиполусные двигатели постоянного тока с параллельным, а чаще со смешанным возбуждением. Двигатели с параллельным возбуждением обычно применяются в преобразователях малой мощности. Запуск мощных преобразователей осуществляется аналогично запуску мощных одноякорных преобразователей постоянного тока (умформеров). В некоторых случаях на полюсах двигателя преобразователя располагается дополнительная последовательная обмотка, включаемая в цепь якоря двигателя на время запуска.

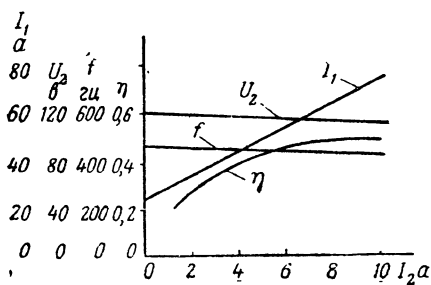
В качестве генераторов переменного тока в преобразователях наибольшее распространение получили индукторные синхронные генераторы двухпакетной конструкции (преобразователи типа МА) и синхронные генераторы с вращающейся якорной обмоткой (преобразователи типа ПО). В большинстве случаев генераторы вращающихся преобразователей выполняются однофазными мощностью от 100 до 6000 *ва* и со скоростью вращения 8000 об/мин.

Несмотря на простоту конструкции индукторных синхронных генераторов (применяемых в преобразователях типа МА), из-за плохого использования в них активных материалов и несинусоидальной формы кривой напряжения они в последнее время вытесняются синхронными генераторами обычной конструкции (преобразователи типа ПО).

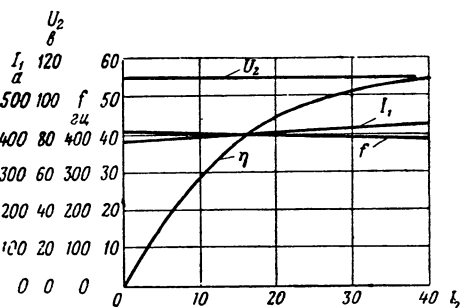
Большинство преобразователей постоянного тока в переменный, особенно преобразователи повышенной мощности, оборудуются автоматическими регуляторами скорости вращения (частоты) и автоматическими регуляторами напряжения. Электрические свойства двигатель-генераторных преобразователей оцениваются двумя семействами характеристик — рабочими и эксплуатационными.

Рабочими характеристиками называются зависимости напряжения U_2 , скорости вращения n (или частоты f), потребляемого тока I_1 и к. п. д. η от величины тока нагрузки I_2 при неизменном подведенном напряжении $U_1 = \text{const}$ и постоянном $\cos \varphi$.

Эксплуатационные характеристики дают зависимость тех же величин от величины подведенного напряжения U_1 при номинальной нагрузке генератора и $\cos \varphi = \text{const}$. На фиг. 13.4 приведены рабочие характеристики преобразователя с индукторным синхронным генератором (пре-

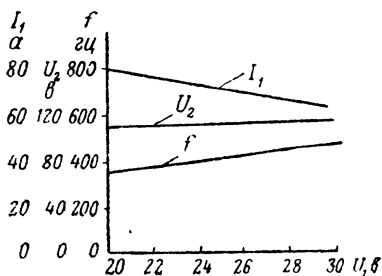


Фиг. 13.4. Рабочие характеристики преобразователя МА-1500.

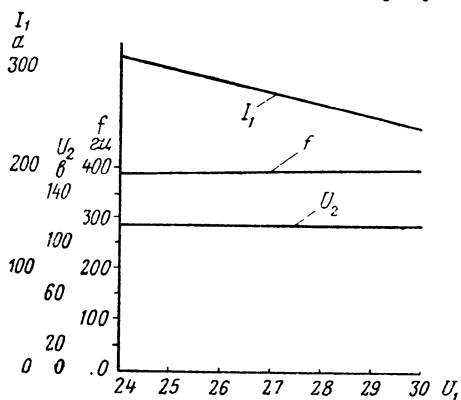


Фиг. 13.5. Рабочие характеристики преобразователя ПО-4500.

образователь МА-1500), снабженным регулятором напряжения, а на фиг. 13.5 — рабочие характеристики преобразователя с обычным синхронным генератором (преобразователь ПО-4500), снабженным регулятором напряжения.



Фиг. 13.6. Эксплуатационные характеристики преобразователя МА-1500.



Фиг. 13.7. Эксплуатационные характеристики преобразователя ПО-4500.

На фиг. 13.6 и фиг. 13.7 приведены эксплуатационные характеристики тех же преобразователей.

§ 13.3. МЕТОДЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

Стабилизация частоты генерируемого тока при одновременном поддержании постоянства выходного напряжения преобразователя сравнительно просто осуществляется только в двигатель-генераторных преобразователях. Во всех остальных типах преобразователей одновременная стабилизация частоты и напряжения практически весьма затруднительна.

Для стабилизации частоты переменного тока, генерируемого преобразователем, очевидно, необходимо стабилизировать скорость вращения электродвигателя, и, следовательно, для этой цели принципиально пригоден любой из имеющихся в настоящее время способов автоматической стабилизации и регулирования скорости вращения электродвигателей постоянного тока.

Практически для стабилизации скорости вращения электродвигателей преобразователей находят применение лишь следующие способы:

а) механический способ с помощью центробежно-тормозных механизмов;

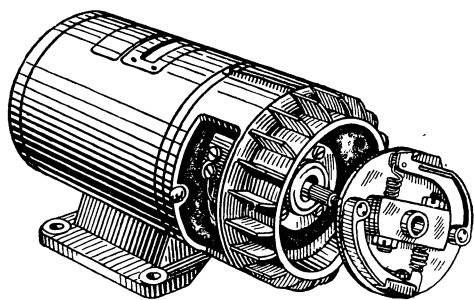
б) электромеханический способ с помощью центробежно-вибрационного регулятора скорости;

в) электрический способ с помощью регуляторов частоты с резонансным контуром.

Два первых способа применяются только для поддержания неизменной скорости вращения двигателей преобразователей малой мощности.

а) Стабилизация частоты с помощью центробежно-тормозного механизма. На валу электродвигателя укрепляется диск, на котором, как показано на фиг. 13.8, смонтированы два или несколько массивных рычагов. Рычаги имеют возможность поворачиваться на осях, укрепленных на диске. Концы рычагов снабжены тормозными колодками и стягиваются пружинами к оси двигателя. При вращении двигателя рычаги под действием центробежных сил начинают оттягивать пружины, и тормозные колодки, соприкасаясь с внутренней поверхностью неподвижного корпуса диска, тормозят электродвигатель.

Параметры пружин выбираются так, чтобы торможение начиналось только при скорости вращения двигателя, соответствующей минимально допустимой частоте $f_{\min}$, при номинальной нагрузке преобразователя и максимально допустимом напряжении источника постоянного тока, питающего преобразователь.



Фиг. 13.8. Устройство центробежно-тормозного автомата для стабилизации частоты.

Потери энергии в тормозе (при указанном способе выбора жесткости пружин) при холостом ходе преобразователя составляют около 85%. Собственно поэтому центробежно-тормозные механизмы применяются для стабилизации частоты преобразователей мощностью не более 40—50 *ва*. Точность стабилизации составляет $\pm 15\%$.

б) Стабилизация частоты с помощью центробежно-вибрационных регуляторов скорости вращения. Схема устройства подобного регулятора представлена на фиг. 13.9. Как видно, регулятор представляет собой диск, насаженный на вал двигателя. На этом диске укреплена контактная пластина таким образом, что она при увеличении скорости вращения стремится под действием центробежных сил изогнуться в сторону удаления от оси вращения. Однако этому препятствует сила натяжения пружины. Последняя имеет такое предварительное натяжение, что подвижная контактная пластина может изогнуться под действием центробежной силы только в том случае, если скорость вращения двигателя несколько превышает номинальное значение.

При этом контакты регулятора замыкаются и из цепи возбуждения двигателя выводится добавочное сопротивление, вследствие чего скорость вращения уменьшается, а контакты регулятора снова размыкаются.

Далее вновь следует увеличение скорости вращения и новое замыкание контактов и т. д.

Контактная пластина регулятора, таким образом, будет находиться в состоянии непрерывных вибраций, что связано с периодическим включением добавочного сопротивления в цепь возбуждения электродвигателя.

При этом скорость вращения двигателя сохраняет неизменное среднее значение, а пульсации ее при большой частоте замыканий контактов и при значительной инерции якоря двигателя незначительны.

С помощью описанного способа удастся стабилизировать частоту, генерируемую преобразователем, с точностью до 2—3%.

Центробежные импульсные регуляторы используются для преобразователей, ток возбуждения которых не превышает 2,0—3,0 а, так как

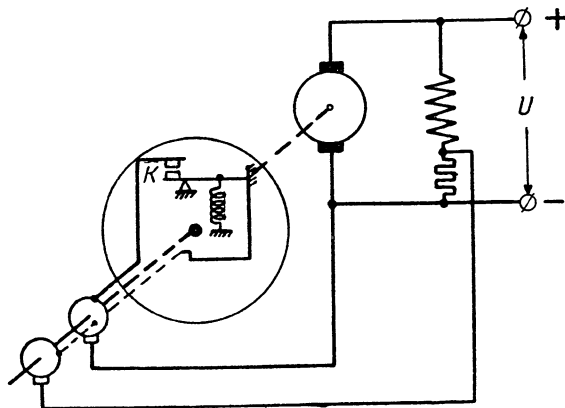
этому способу присущи все недостатки, свойственные вибрационным регуляторам и описанные в гл. VI.

в) Регулятор частоты с резонансным контуром. На фиг. 13.10 изображена принципиальная схема соединений обмоток преобразователя двигатель-генераторного типа, предназначенного для превращения постоянного тока низкого напряжения 27,5 в в однофазный переменный ток с частотой 400 гц и напряжением 115 в.

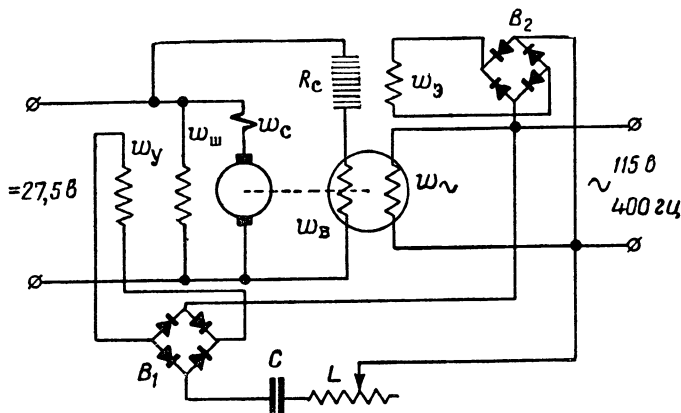
Стабилизация напряжения осуществляется с по-

мощью угольного регулятора, воздействующего на цепь возбуждения генератора.

Двигатель, как видно из фиг. 13.10, имеет три согласно включенные обмотки возбуждения: параллельную обмотку $\omega_{\text{ш}}$, включенную парал-



Фиг. 13.9. Схема устройства центробежно-вибрационного регулятора скорости.



Фиг. 13.10. Принципиальная схема регулятора частоты с резонансным контуром.

лельно якорю электродвигателя, последовательную обмотку $\omega_{\text{с}}$ с небольшим числом витков на полюс и управляющую обмотку $\omega_{\text{у}}$.

Управляющая обмотка питается выпрямленным током от двухполупериодного выпрямителя B_1 , который включен последовательно с конденсатором C и дросселем L на зажимы обмотки $\omega_{\sim}$ генератора переменного тока.

Эффективное значение тока в управляющей обмотке двигателя при постоянных L и C зависит от угловой частоты генератора и определяется формулой

$$I_y = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}},$$

где r — активное сопротивление цепи управляющей обмотки.

Изменение тока в управляющей обмотке двигателя при $U = \text{const}$ в зависимости от частоты характеризуется резонансной кривой, изображенной на фиг. 13.11 (кривая 3).

Соотношение между L и C подбирается таким, чтобы явление резонанса наступало при частоте ω_0 , несколько большей (на 20—25%) номинального значения частоты (400 гц). При частоте 400 гц рабочая точка находится на восходящей ветви кривой резонанса.

При холостом ходе преобразователя, когда скорость вращения несколько выше, чем при нагрузке, ток в управляющей обмотке достигает значения, близкого к максимальному. Режим работы преобразователя определяется для этого случая точкой пересечения регулировочной характеристики управляющей обмотки, соответствующей холостому ходу (кривая 1, точка A_1 на фиг. 13.11), с резонансной кривой 3.

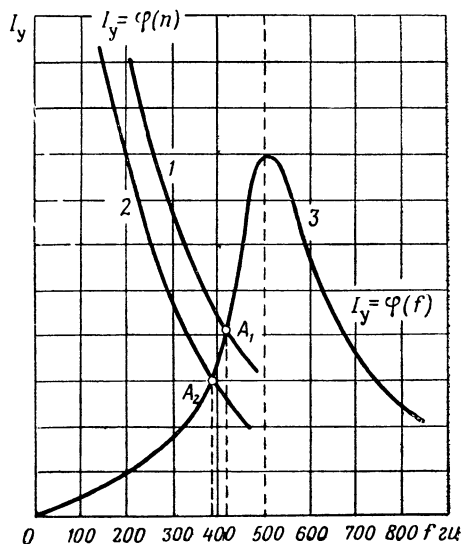
С увеличением нагрузки преобразователя скорость вращения его, а следовательно, и частота переменного тока снижаются, но этому снижению противодействует уменьшение тока в управляющей обмотке возбуждения двигателя, которое вызывается снижением частоты. При максимально допустимой нагрузке преобразователя режим работы определяется точкой пересечения A_2 регулировочной характеристики, соответствующей этому режиму (кривая 2 на фиг. 13.11), с резонансной кривой.

При правильном выборе параметров контура изменение нагрузки в пределах от нуля до максимальной не вызывает существенного изменения скорости вращения двигателя и, следовательно, частоты генерируемого тока. Чем больше крутизна участка резонансной кривой, на котором располагаются точки пересечения A_1 и A_2 , тем меньше отклонения частоты от номинального значения.

С помощью регулятора частоты с резонансным контуром удастся стабилизировать частоту с точностью $\pm 5\%$.

Дроссель и конденсатор, образующие резонансный контур, должны быть рассчитаны на максимальный ток управляющей обмотки возбуждения, который в мощных преобразователях может достигать 2—3 а. Вследствие этого увеличиваются габариты и вес контура.

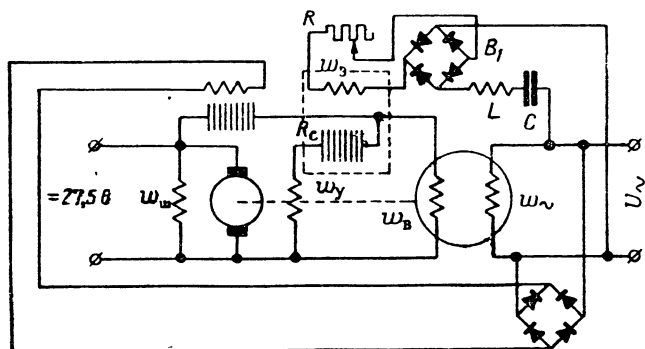
Значительно более точная стабилизация частоты (до $\pm 1\%$) получается при применении схемы с резонансным контуром и усилителем в виде угольного регулятора (фиг. 13.12).



Фиг. 13.11. Зависимость тока в управляющей обмотке электродвигателя от частоты: $I_y = \varphi(f)$.

Выпрямленное напряжение с селенового выпрямителя B_1 , включенного последовательно с резонансным контуром L и C , подается на обмотку электромагнита ω , угольного регулятора напряжения. Угольный столбик регулятора включен в управляющую обмотку возбуждения двигателя, питание которой производится от бортовой сети.

Соотношение между L и C подбирается таким, чтобы явление резонанса наступало при частоте f_0 , несколько меньшей номинального значения частоты (фиг. 13.13).



Фиг. 13.12. Принципиальная схема резонансного регулятора частоты с угольным регулятором.

При частоте 400 гц рабочая точка находится на падающей ветви кривой резонанса.

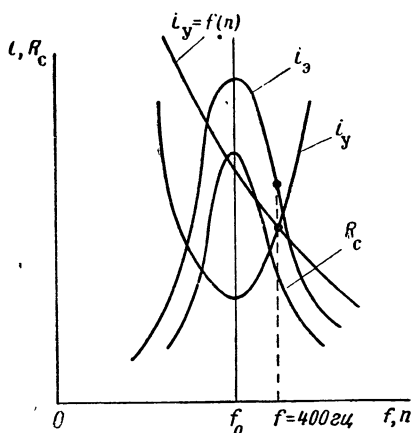
При увеличении скорости вращения и, следовательно, частоты уменьшается ток в обмотке электромагнита регулятора, уменьшается сопротивление цепи возбуждения управляющей обмотки, вследствие чего уменьшается и скорость вращения двигателя. Наоборот, уменьшение частоты вызывает увеличение сопротивления цепи возбуждения, уменьшение тока возбуждения управляющей обмотки и, следовательно, увеличение скорости вращения и частоты.

Так как регулятор поддерживает постоянный ток в обмотке электромагнита регулятора $I_s = \text{const}$, то при $U = \text{const}$ из выражения

$$I_s = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

следует, что регулятор поддерживает постоянство частоты $f = \frac{\omega}{2\pi} = \text{const}$.

Фиг. 13.13. Зависимость тока в обмотке электромагнита регулятора, тока в управляющей обмотке электродвигателя и сопротивления угольного столбика от частоты.



Напряжение генератора переменного тока стабилизируется с помощью угольного регулятора напряжения, как и в схеме, изображенной на фиг. 13.10.

Для автоматического регулирования частоты используются также схемы с магнитными усилителями. Простейшим примером такой схемы может служить схема, изображенная на фиг. 13.14.

Магнитный усилитель имеет три обмотки: обмотку переменного тока $\omega_{\sim}$, обмотку управления ω_y и обмотку обратной связи ω_{oc} .

Управляющая обмотка возбуждения $\omega_{y,д}$ электродвигателя преобразователя питается от двухполупериодного выпрямителя B_1 , включенного последовательно с обмоткой переменного тока дросселя насыщения на зажимы генератора преобразователя.

Выпрямленный ток от выпрямителя B_1 протекает через управляющую обмотку возбуждения электродвигателя и обмотку обратной связи ω_{oc} магнитного усилителя.

Так как напряжение генератора переменного тока стабилизируется с помощью угольного регулятора напряжения, то можно считать $U = \text{const}$. При этом ток в цепи управляющей обмотки электродвигателя зависит только от индуктивного сопротивления обмотки переменного тока магнитного усилителя, а последнее определяется его насыщением.

Подмагничивание магнитного усилителя создается обмоткой ω_y , приключенной через выпрямитель B_2 и резонансный контур на зажимы генератора преобразователя.

Соотношение между L и C резонансного контура подбирается таким, чтобы явление резонанса наступало при частоте, несколько большей номинальной частоты. При частоте 400 гц рабочая точка находится на восходящей части кривой резонанса.

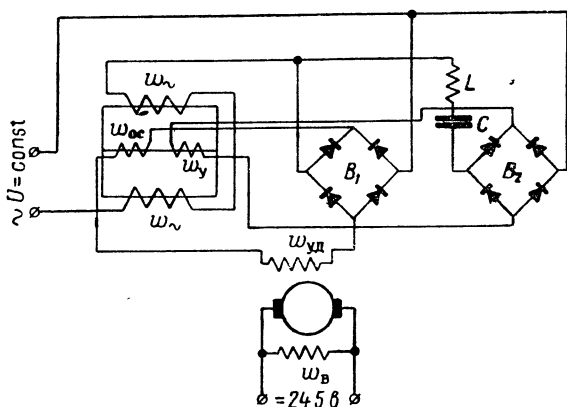
При $U \approx \text{const}$ ток, протекающий через управляющую обмотку магнитного усилителя, зависит только от частоты преобразователя. При увеличении частоты по сравнению с номинальной ток в управляющей обмотке и насыщение магнитного усилителя возрастают. В результате этого уменьшается индуктивное сопротивление обмотки переменного тока $\omega_{\sim}$ и увеличивается ток в управляющей обмотке электродвигателя, что приводит к уменьшению скорости вращения и частоты.

При уменьшении частоты происходят обратные процессы.

В описываемой схеме (фиг. 13.14) всегда имеет место значительное начальное подмагничивание магнитного усилителя, вследствие чего пределы регулирования оказываются весьма малыми.

Более эффективна для регулирования частоты дифференциальная схема, изображенная на фиг. 13.15. В схеме имеется два резонансных контура, из которых один настроен на частоту несколько меньше номинальной, а другой — на частоту несколько больше номинальной.

Дроссельный магнитный усилитель имеет две одинаковые управляющие обмотки ω_{y1} и ω_{y2} . При частоте генератора, равной номинальной, через эти обмотки протекают одинаковые токи, которые создают встречные подмагничивающие поля. При уменьшении частоты ток в управляющей обмотке ω_{y1} , подключенной к контуру, резонансная частота которого больше номинальной, уменьшается, а во второй управляющей обмотке ω_{y2} , подключенной к контуру, резонансная частота которого меньше номинальной, увеличивается. В магнитной цепи усили-



Фиг. 13.14. Принципиальная схема резонансного регулятора частоты с магнитными усилителями.

теля будет действовать результирующая м. д. с., которая пропорциональна разности токов $\Delta I_y = I_{y2} - I_{y1}$.

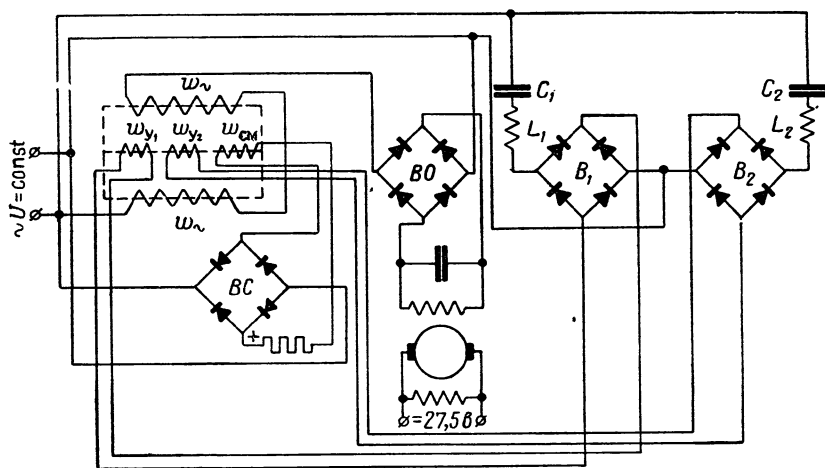
Изменение ΔI_y в зависимости от изменения частоты показано на фиг. 13.16.

Кроме этой м. д. с., в магнитной цепи действует еще м. д. с., обусловленная наличием обмотки w_{cm} , с помощью которой создается начальное подмагничивание дросселя.

Результирующая м. д. с., подмагничивающая дроссель, пропорциональна алгебраической сумме токов:

$$I_y = I_{cm} + (I_{y2} - I_{y1}) = I_{cm} + \Delta I_y.$$

При увеличении частоты увеличивается ток подмагничивания I_y и уменьшается индуктивное сопротивление дросселя, а следовательно,



Фиг. 13.15. Принципиальная схема резонансного регулятора частоты с магнитными усилителями.

возрастает ток возбуждения в управляющей обмотке двигателя. При этом скорость вращения двигателя, а следовательно, и частота тока, генерируемого преобразователем, понижается.

При уменьшении частоты происходят обратные процессы. Регулятор частоты по описанной схеме согласно данным М. А. Розенблата может поддерживать частоту синхронного генератора с точностью до $\pm 1\%$.

Зависимость тока в управляющей обмотке возбуждения электродвигателя I_{y0} от I_y может быть выражена так называемой характеристикой усиления магнитного усилителя по току (фиг. 13.17). Разность $\Delta I_y = I_{y2} - I_{y1}$ зависит от частоты генерируемого тока.

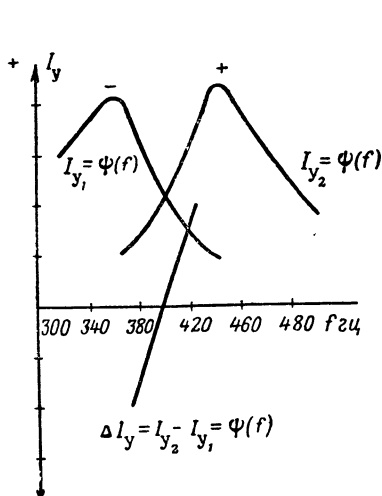
При частоте, равной номинальной, $I_{y1} = I_{y2}$, режим работы преобразователя характеризуется на кривой $I_{y0} = f(I_y)$ точкой O' .

Зная зависимость ΔI_y от частоты, можно построить зависимость от частоты и тока I_{y0} в управляющей обмотке возбуждения электродвигателя. Как видно из фиг. 13.17, эта характеристика имеет очень большую крутизну, что обеспечивает весьма точную стабилизацию частоты.

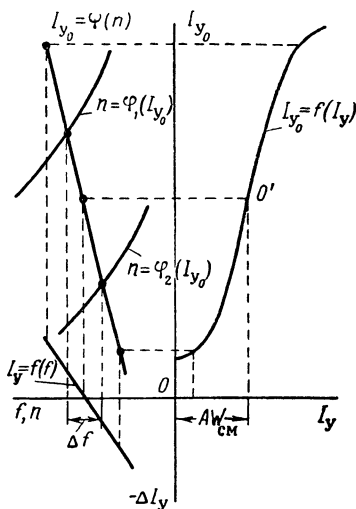
Пределы изменения частоты можно определить, проведя на графике $I_{y0} = F(f) = \psi(n)$ регулировочные характеристики управляющей обмотки возбуждения электродвигателя, соответствующие режиму холостого хода $n = \varphi_1(I_{y0})$ при $I_2 = 0$ и режиму максимальной нагрузки $n = \varphi_2(I_{y0})$. Точки пересечения этих характеристик с характеристикой $I_{y0} = \psi(n)$ дают пре-

делу изменения скорости вращения двигателя, а следовательно, и частоты генерируемого тока.

Очень часто в дополнение к основным обмоткам ω , ω_{y1} и ω_{y2} на дросселе размещают еще обмотку обратной связи ω_{oc} , с помощью которой осуществляется (так называемая гибкая обратная связь) обратная



Фиг. 13.16. Зависимости $I_{y1} = \psi_1(f)$; $I_{y2} = \psi_2(f)$.



Фиг. 13.17. Определение пределов изменения частоты преобразователя.

связь по производной от тока в управляющей обмотке возбуждения. При наличии гибкой обратной связи процесс регулирования частоты более устойчив.

§ 13.4. СТАТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА В ПОСТОЯННЫЙ

В качестве преобразователей переменного тока в постоянный в большинстве случаев используются статические преобразователи-выпрямители, которые по сравнению с электромашинными вращающимися преобразователями обладают следующими существенными преимуществами:

- а) отсутствие вращающихся и подвижных частей;
- б) безискровая коммутация тока;
- в) отсутствие действия, мешающего радиоприему;
- г) бесшумность работы;
- д) отсутствие надобности в постоянном уходе;
- е) отсутствие необходимости в применении реле обратного тока при зарядке аккумуляторов.

Выпрямительная установка обычно содержит трансформатор, преобразующий подаваемое из сети напряжение в необходимое для выпрямителя (при этом часто одновременно преобразуется число фаз, выводится нулевая точка и т. д.), и электрический вентиль — прибор, пропускающий ток в одном направлении и почти не пропускающий в другом.

В случае необходимости выпрямительные установки снабжаются также сглаживающими фильтрами и различными вспомогательными устройствами: трансформаторами накала, устройствами для регулирования напряжения и т. п.

В зависимости от типа используемого вентиля выпрямительные установки разделяют на три основные группы: а) электронные выпрямители; б) ионные выпрямители; в) полупроводниковые выпрямители.

В схемах электрооборудования самолета наибольшее распространение нашли полупроводниковые выпрямители, так как по сравнению с электронными и ионными выпрямителями они обладают преимуществами в отношении механической прочности и нечувствительности к вибрациям, срока службы, к. п. д. (при малых значениях выпрямленного напряжения), простоты эксплуатации. Кроме того, полупроводниковые выпрямители не требуют отдельной цепи возбуждения или накала, могут быть немедленно приведены в действие простым подключением к сети, в то время как для ионных и электронных выпрямителей необходимо некоторое время для прогрева катода; пригодны для составления любых схем выпрямления, в том числе и мостиковых схем, и, наконец, обладают более высокой перегрузочной способностью.

К недостаткам некоторых полупроводниковых выпрямителей (в частности, селеновых и меднозакисных) следует отнести, во-первых, то, что потери напряжения увеличиваются вместе с выпрямленным напряжением. Поэтому к. п. д. полупроводниковых выпрямителей при низких выпрямленных напряжениях выше, а при более высоких напряжениях ниже, чем у электронных и ионных.

Во-вторых, внутреннее падение напряжения несколько возрастает с увеличением нагрузки, вследствие чего наблюдается заметная разница между величинами напряжений при холостом ходе и при полной нагрузке.

Несмотря на указанные недостатки, полупроводниковые выпрямители являются лучшим типом выпрямителей для самолетных электрических систем и находят поэтому широкое применение в различных авиационных электрических устройствах.

В настоящее время существует много видов полупроводниковых вентилях, однако широкое практическое применение в современной электротехнике нашли два вида: купроксные (меднозакисные) и селеновые.

В последнее время разработаны и начинают применяться новые типы полупроводниковых выпрямителей — германиевые и кремниевые вентили, которые по свойствам значительно превосходят все упомянутые выше.

На самолетах в настоящее время используются в основном селеновые выпрямители. В недалеком будущем можно ожидать, что широкое применение на самолете найдут германиевые и кремниевые выпрямители. Селеновые выпрямители применяются в стабилизаторах и регуляторах напряжения, в схемах защиты, в схемах самовозбуждения генераторов переменного тока, в различного рода приборах. Германиевые и кремниевые выпрямители рационально использовать в системах энергоснабжения постоянного тока, в которых постоянный ток получается путем выпрямления переменного тока, получаемого от синхронных генераторов. Эти выпрямители могут быть выполнены для выпрямления больших токов.

Полупроводниковые выпрямители широко используются в зарядных станциях для зарядки авиационных аккумуляторов.

Ниже излагаются только основные сведения относительно полупроводниковых выпрямителей, применяющихся на самолете, и схем их включения. Рассмотрение ионных и электронных устройств выходит за пределы программы курса.

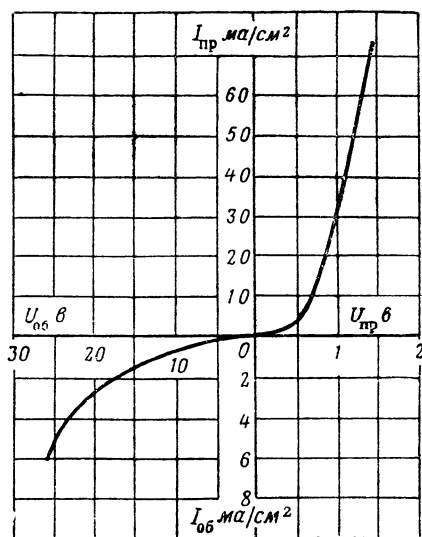
Селеновый выпрямитель состоит из двух электродов, между которыми находится тонкий слой кристаллического селена: като-

дом служит оплав, содержащий кадмий, а контактным электродом является железный или алюминиевый электрод, покрытый никелем или висмутом (фиг. 13.18).

При прохождении тока от селена к катоду вентиль имеет малое сопротивление (прямое), при прохождении тока в противоположном направлении — большое сопротивление (обратное).

Выпрямительное действие селенового вентиля вызывается большим изменением электрического сопротивления тонкой пограничной части селенового слоя — запорного слоя — при изменении направления прохождения тока через вентиль.

Теория выпрямительного действия селенового вентиля разработана в 1937 г. Б. И. Давыдовым и развита и уточнена академиком А. Ф. Иоффе. Согласно этой теории сопротивление запорного слоя изменяется благодаря свойству селена сильно менять свою электропроводность под действием объемного электрического заряда: положительный заряд увеличивает, а отрицательный уменьшает электропроводность селена во много раз.



Фиг. 13.19. Вольтамперная характеристика селенового вентиля.

С увеличением обратного напряжения до 0,2 в сопротивление вентиля возрастает, а приблизительно с 0,2 в возрастание напряжения приводит к уменьшению сопротивления за счет ионизирующего действия сильного электрического поля.

При обратных напряжениях выше 25—35 в обратный ток настолько увеличивается, что обычный селеновый вентиль теряет свои выпрямительные свойства.

С повышением напряжения в прямом направлении сопротивление выпрямителя резко падает. Так, при 0,5 в оно составляет около 200 ом/см², а при 1,5 в — 20 ом/см².



Фиг. 13.18. Схематический разрез селенового выпрямителя.

1—контактный электрод — железный или алюминиевый диск, 2—слой никеля, 3—основной слой кристаллического селена, 4—запорный слой, 5—катод—сплав кадмия с висмутом.

Основные электрические свойства селенового вентиля характеризуются его вольтамперной характеристикой, т. е. зависимостью между мгновенными значениями тока и напряжения вентиля. Нелинейный характер вольтамперной характеристики и создает выпрямительное действие селенового вентиля.

На фиг. 13.19 приведена вольтамперная характеристика селенового вентиля, снятая при постоянном токе и окружающей температуре 20° С. При очень малых напряжениях (до 0,01 в) селеновый вентиль обладает одинаковым сопротивлением в обоих направлениях. Плотность тока в этом случае составляет доли микроампера на 1 см². Это объясняется, повидимому, тем, что объемные заряды, возникающие в запорном слое при очень малых токах, незначительны и не могут существенно изменить имеющуюся концентрацию носителей тока.

На прямое сопротивление выпрямителя сильное влияние оказывает изменение температуры. С возрастанием температуры оно уменьшается. Можно принять, что увеличение температуры на 1°C (в пределах от $+20$ до 60°C) сопровождается понижением прямого сопротивления на 1% . Эта температурная зависимость объясняется увеличением электропроводности селена при возрастании температуры.

При малых обратных напряжениях на вентиле температурная зависимость сопротивления вентиля также отрицательна и имеет такой же порядок, как и при прямом токе. В области напряжений ($10\text{--}20$ в) обратное сопротивление вентиля не зависит от температуры.

Вольтамперная характеристика селенового вентиля не проходит через начало координат вследствие того, что вентиль имеет собственную э. д. с. порядка десятков, а иногда и сотен милливольт. Правда, практическое значение собственной э. д. с. мало, так как она обычно значительно меньше внешних э. д. с.

Вольтамперная характеристика селенового вентиля практически не зависит от малых механических давлений (доли килограмма на квадратный сантиметр). При больших давлениях на катод обратное сопротивление вентиля уменьшается. Падение обратного сопротивления от давления связано с деформациями и механическими повреждениями запорного слоя, однако это явление не имеет существенного значения в эксплуатации, так как конструкция выпрямителей выполняется такой, что они обладают высокой механической прочностью и мало чувствительны к ударам и тряске.

При обратных напряжениях $50\text{--}70$ в происходит пробой селенового вентиля. Пробой заключается в тепловом разрушении части селенового слоя и катода под действием больших обратных токов. Пробой сопровождается искрой с характерным треском и приводит к расплавлению катода и оплавлению селена. Пробивное напряжение имеет большое значение для эксплуатации. Обычно для надежной работы из соображений электрической прочности не допускают длительного обратного напряжения на селеновых вентилях с амплитудой более 25 в.

Весьма вредное влияние на селеновые вентили оказывают пары воды и различных кислот.

Увеличение влажности воздуха уменьшает обратное сопротивление вентиля. Продолжительная эксплуатация вентиля в условиях 100% -ной влажности выводит их из строя. К такому же результату приводит работа выпрямителей в парах серной, соляной и азотной кислот.

В целях предохранения от воздействия паров селеновые вентили защищают лакокрасочным покрытием. Окрашенные вентили допускают продолжительную эксплуатацию в атмосфере с влажностью 95% .

Селеновые вентили подвержены старению, которое заключается в необратимом повышении их прямого сопротивления с течением времени. Старение сильно зависит от температуры. Максимально допустимой температурой для селенового вентиля считается 75°C .

Вольтамперные характеристики селеновых вентилях принято выражать приближенными формулами:

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{пр. н}} \left(\frac{i_{\text{пр}}}{i_{\text{пр. н}}} \right)^{\alpha_1},$$

$$i_{\text{об}} = i_{\text{об. н}} \left(\frac{U_{\text{об}}}{U_{\text{об. н}}} \right)^{\alpha_2},$$

где $U_{\text{пр}}$, $i_{\text{пр}}$ — мгновенные значения прямого напряжения и прямого тока вентиля;

$U_{об}$, $i_{об}$ — мгновенные значения обратного напряжения и тока вентиля;

$U_{пр.н}$ — напряжение на вентиле, соответствующее прямому току вентиля, 50 $ма/см^2$;

$U_{об.н}$ — напряжение на вентиле, соответствующее обратному току, 4 $ма/см^2$;

α_1 и α_2 — параметры вентиля.

Для большей части отечественных вентилях $U_{пр.н}=0,9-1,5$ в; $U_{об}=15-30$ в; $\alpha_1=0,25-0,5$; $\alpha_2=2-4$.

Качества вентиля характеризуют или величиной $\frac{U_{об.н}}{U_{пр.н}}$, которую называют классом вентиля, или коэффициентом выпрямления — отношением прямого тока к обратному при данных напряжениях.

При напряжении 2 в коэффициент выпрямления селенового вентиля достигает нескольких тысяч. Зависимость коэффициента выпрямления от напряжения на селеновом вентиле приведена на фиг. 13.20.

Остов селенового вентиля представляет собой тонкий стальной никелированный диск (фиг. 13.21), покрытый с одной стороны слоем селена. Слой никеля не должен превышать 2 микронов, чтобы не увеличивать сопротивления вентиля в прямом направлении. Толщина слоя селена после термической обработки и прессовки составляет примерно 0,1 мм.

На слой селена наносят (набрызгиванием) тонкий слой сплава кадмия и олова, который и служит катодом вентиля.

Для того чтобы избежать замыкания между слоем металлического сплава и стальным диском, сплав набрызгивают в виде кольца (фиг. 13.21), у которого наружный диаметр несколько меньше диаметра диска, а внутренний диаметр больше диаметра отверстия. Площадь кольца соответствует активной поверхности селенового вентиля.

Пружинная контактная шайба изготавливается из твердотянутой латуни толщиной от 0,2—0,3 мм. Чаще всего вентильные элементы имеют диаметр 20, 30, 45, 60, 80, 120 мм.

Вентили собирают обычно на изолированных шпильках (фиг. 13.22). Для параллельного соединения элементов между собой и включения их во внешнюю цепь применяются контактные выводы. Так как параллельно и последовательно может быть соединено любое количество дисков, то выпрямители могут быть сконструированы на большие величины токов или очень высокие напряжения.

Основные параметры современных селеновых вентилях приведены в табл. 13.1.

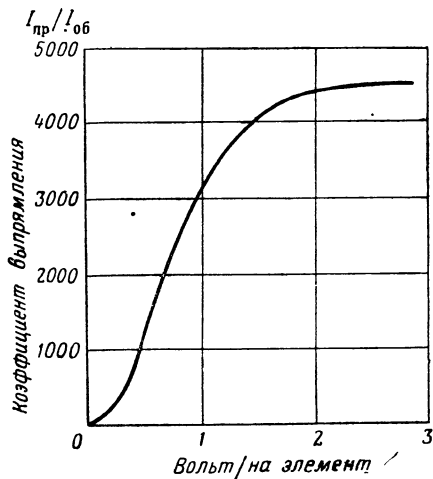
Таблица 13.1

Электрические параметры современных селеновых выпрямителей

Диаметр диска в мм	Толщина диска в мм	Диаметр отверстия в мм	Выпрямленный ток в а при 20 в, 50 гц		Максимальный обратный ток в ма
			однофазное включение	трехфазное включение	
100	1,2	10,5	3,0	4,5	60
45	0,8	7,5	0,6	0,9	12
35	0,8	5,2	0,3	0,45	9
25	0,8	5,2	0,15	0,23	7
18	0,8	5,2	0,075	0,112	5

При нагрузках, указанных в табл. 13.1, падение напряжения на вентилях не превышает 1,5—1,7 в.

При продолжительной работе максимальное допустимое обратное напряжение при удельной нагрузке 40—50 ма/см^2 не более 14—18 в (эффективных).



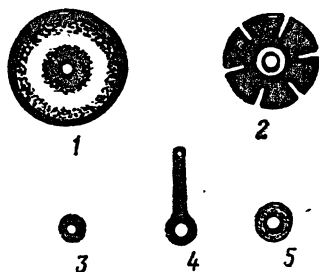
Фиг. 13.20. Зависимость коэффициента выпрямления от напряжения на селеновом вентиле.

У обычных селеновых вентилях на железной основе удельный вес на единицу мощности при средней нагрузке и при естественном охлаждении равен 16—18 кг на 1 кВт и 8—9 кг на 1 кВт при искусственном охлаждении.

За последние годы Академией наук Узбекской ССР проведены работы по дальнейшему улучшению электрических характеристик и снижению веса селеновых выпрямителей. В результате этих работ удалось повысить обратное напряжение до 40 в на один элемент и снизить вес на 30%.

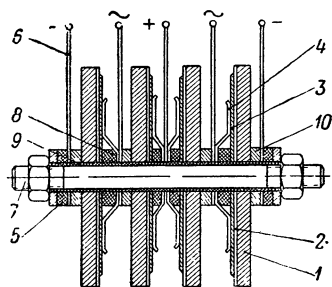
Германиевые выпрямители и обладают более высокими качествами, чем селеновые. На фиг. 13.23 приведены сравнительные характеристики германиевых и селеновых выпрямителей, имеющих одинаковые токи в прямом направлении.

Обратное напряжение германиевых выпрямителей составляет 600 в и более. Плотность тока в них может достигать 100 а/см^2 и более. Специальные конструкции германиевых выпрямителей допускают эффектив-



Фиг. 13.21. Детали селенового выпрямителя.

1—селеновый выпрямительный диск, 2—контактная шайба, 3—ограничительная шайба, 4—вывод, 5—дистанционная шайба.



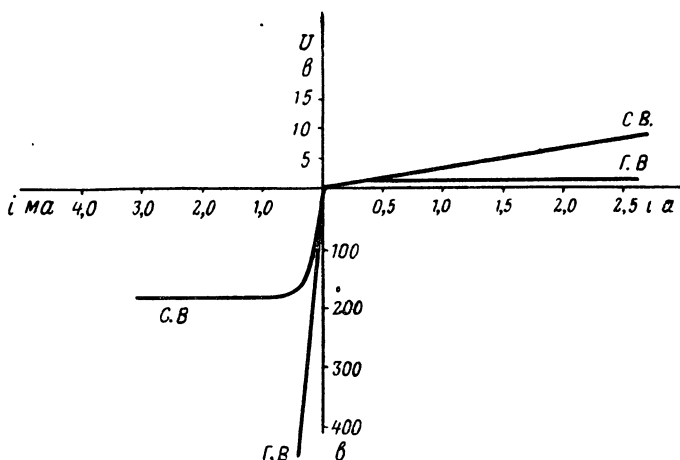
Фиг. 13.22. Продольный разрез селенового выпрямителя.

1—железный диск, 2—слой селена, 3—катодный сплав, 4—контактная шайба, 5—изоляционная шайба, 6—контактный вывод, 7—шпилька с гайками, 8—ограничительная шайба, 9—изоляционная трубка, 10—дистанционная шайба.

ную работу при еще более высоких плотностях тока. Вес германиевых выпрямителей при расчетных плотностях тока 50—60 а/см^2 на 1 кВт мощности равен примерно 170 г, а объем порядка 60 см^3 .

Коэффициент полезного действия германиевых выпрямителей равен примерно 97% и выше, в то время как для селеновых выпрямителей к. п. д. не превышает 82—85%.

Германиевые выпрямители можно использовать при температурах не более 75°C , так как при температуре выше 100°C выпрямляющие свойства германия теряются.



Фиг. 13.23. Сравнительные характеристики германиевых и селеновых выпрямителей, имеющих одинаковые токи в прямом направлении.

Отличительной особенностью кремниевых выпрямителей является то, что они, обладая теми же электрическими свойствами, как и германиевые, способны нормально работать при изменениях температуры от -60 до $+250^{\circ}\text{C}$.

§ 13.5. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ВЕНТИЛЕЙ ПРИ ВЫПРЯМЛЕНИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Среди большого количества известных схем включения полупроводниковых вентилялей наиболее употребляемыми являются схемы, изображенные на фиг. 13.24—13.29.

Схемы фиг. 13.24—13.26 выполняются с однофазным трансформатором, схемы фиг. 13.27—13.29 — с трехфазным.

Схемы фиг. 13.24 и 13.27 называются однополупериодными, а остальные схемы — двухполупериодными.

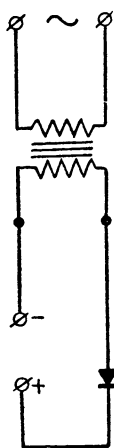
Вентиль, взятый в отдельности, пригоден только для применения в однополупериодной схеме выпрямления (фиг. 13.24). Такая схема на практике встречается сравнительно редко из-за плохого использования трансформатора и вентиля, а также вследствие больших пульсаций выпрямленного тока, для сглаживания которых необходимы громоздкие фильтры.

При обыкновенной двухполупериодной схеме выпрямления однофазного тока (фиг. 13.26) трансформатор должен иметь две вторичные обмотки, соединенные последовательно и имеющие общий вывод.

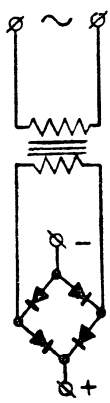
Наиболее рациональны мостиковые схемы включения — однофазная (фиг. 13.25) и трехфазная, предложенная проф. А. Н. Ларионовым (фиг. 13.28). Эти схемы по сравнению с обычными схемами включения отличаются высоким использованием трансформатора, низким обратным напряжением и допускают применение обычных трансформаторов.

Однофазная мостиковая схема (фиг. 13.25) требует только одной вторичной обмотки трансформатора. При этом в мостиковой схеме общее

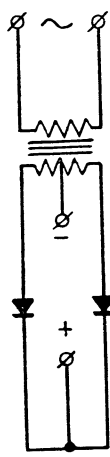
напряжение вторичной обмотки равно половине общего напряжения вторичных обмоток обычной схемы. Трансформатор для мостиковых схем оказывается более легким, вследствие того что на его изготовление затрачивается меньше материала.



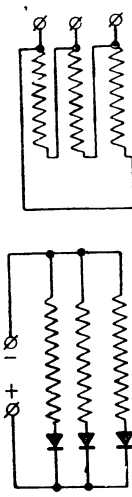
Фиг. 13.24.
Схема
включения
вентилей.



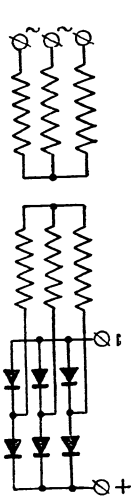
Фиг. 13.25.
Схема
включения
вентилей.



Фиг. 13.26.
Схема
включения
вентилей.



Фиг. 13.27.
Схема
включения
вентилей.



Фиг. 13.28.
Схема
включения
вентилей.

Аналогичными свойствами обладает трехфазная мостиковая схема А. Н. Ларионова. Для этой схемы характерно высокое использование трансформатора и вентилей, отсутствие вынужденного намагничивающего тока сердечника трансформатора, малые пульсации выпрямленного тока.

Для осуществления трехфазной схемы А. Н. Ларионова используется трансформатор с обычным соединением вторичных обмоток — звездой или треугольником, в то время как для трехфазного выпрямителя по обычной схеме (фиг. 13.29) необходим трансформатор с шестифазной вторичной обмоткой и с выведенной средней точкой; при этом возможна только одна схема соединения вторичных обмоток — звездой.

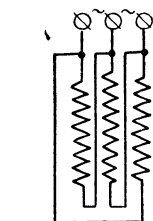
Коэффициент полезного действия твердых выпрямителей зависит от качества самого выпрямителя, определяемого коэффициентом выпрямления, от схемы соединения и величины и характера нагрузки.

Теоретический к. п. д. определяется как отношение мощности постоянной составляющей выпрямленного тока к мощности его эффективного значения. При этом считается, что сопротивление выпрямителя в прямом направлении равно нулю, а в обратном — бесконечности.

К. п. д. твердых выпрямителей при различных нагрузках вычисляется следующим образом:

$$\eta = \frac{P_{\text{в}}}{P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{пр}} + \Delta P_{\text{об}}}.$$

Здесь $P_{\text{в}}$ — полезная мощность выпрямленного тока;
 $\Delta P_{\text{пр}}$ — потери в выпрямителе в проводящем направлении;
 $\Delta P_{\text{об}}$ — потери в выпрямителе в обратном направлении.



Фиг. 13.29
Схема
включения
вентилей.

Среднее значение потерь за один период

$$\Delta P = \Delta P_{\text{пр}} + \Delta P_{\text{об}} = \frac{1}{T} \left[\int_0^T i_{\text{пр}} U_{\text{пр}} dt + \int_0^T i_{\text{об}} U_{\text{об}} dt \right],$$

где $i_{\text{пр}}$, $U_{\text{пр}}$, $i_{\text{об}}$, $U_{\text{об}}$ — мгновенные значения прямых и обратных токов и напряжений.

При индуктивной нагрузке эффективное значение выпрямленного тока приближается к среднеарифметическому, а при активной, наоборот, сильно отклоняется от него. Поэтому при индуктивной нагрузке к. п. д. получается большим, чем при активной нагрузке.

На фиг. 13.30 изображена зависимость к. п. д. от нагрузки (в % от номинальной) для трехфазной (кривая 2) и однофазной (кривая 1) мостиковых схем выпрямителей с селеновыми вентилями.

Для получения той или иной схемы выпрямления полупроводниковые вентили собирают в так называемые выпрямительные столбики.

Для мостиковой схемы число последовательно включенных вентилях n в одном плече схемы находят из равенства

$$n = \frac{U_{\text{л}} \sqrt{2}}{U_{\text{об}}},$$

где $U_{\text{л}}$ — эффективное значение линейного напряжения трансформатора на холостом ходу;

$U_{\text{об}}$ — допустимое обратное напряжение на один выпрямитель.

Если для заданной нагрузки одного диска недостаточно, то включают два диска (или больше) параллельно.

Число параллельных ветвей m находят из равенства

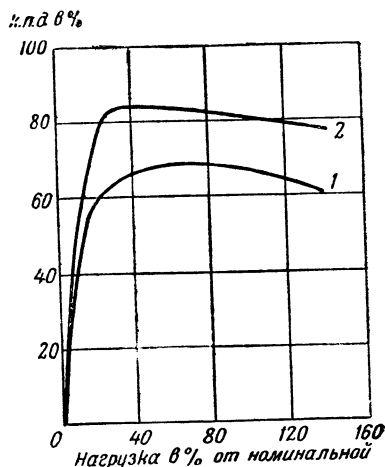
$$m = \frac{I_{\text{в}}}{i_{\text{в}}},$$

где $I_{\text{в}}$ — заданный ток нагрузки;

$i_{\text{в}}$ — выпрямленный ток на один диск в плече для выбранной схемы включения.

Допускается параллельное включение дисков, у которых разница в величинах падения напряжения в прямом направлении не выходит за пределы 0,2 в.

При последовательном соединении дисков считается допустимой разница в обратных напряжениях, не превышающая 2—3 в.



Фиг. 13.30. Зависимость к. п. д. от нагрузки для однофазной (1) и трехфазной (2) мостиковых схем с селеновыми вентилями.

Глава XIV

ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК И ВЫБОР ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА САМОЛЕТЕ

§ 14.1. ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКА НАГРУЗОК САМОЛЕТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Элементы самолетного электрооборудования в процессе эксплуатации, как правило, используются не одновременно, так как большинство потребителей (особенно большой мощности) включаются только кратковременно и к тому же на различных этапах полета самолета. Поэтому нагрузка источников электрической энергии самолета во время полета получается обычно очень неравномерной. Это затрудняет выбор источников электрической энергии на самолете. С одной стороны, источники энергии на самолете должны обеспечить надежное снабжение электрической энергией всех потребителей для самого неблагоприятного, с точки зрения потребления электрической энергии, режима работы этих потребителей, с другой стороны, эти источники должны обладать минимальным весом и габаритами и быть по возможности полностью использованы в процессе эксплуатации.

Если производить выбор источников электрической энергии исходя из полной установленной мощности всех потребителей на самолете, то вес и габариты источников будут сильно завышены, а использоваться они будут не полностью. Если же номинальную мощность источников взять недостаточно большой, то они могут оказаться не в состоянии обеспечить наиболее напряженный режим работы электрооборудования самолета, что может привести к очень серьезным последствиям, вплоть до аварии самолета.

При выборе мощности источников электрической энергии всегда необходимо предусматривать резерв на случай выхода из строя одного или нескольких генераторов, причем этот резерв должен обеспечивать выполнение боевого задания при минимально необходимом количестве потребителей.

Наконец, выбор источников электрической энергии на самолете осложняется еще необходимостью согласования мощности основных и резервных источников друг с другом. Как известно, первичные источники электрической энергии на самолете можно разделить на две категории. К первой категории относятся основные источники электрической энергии, которые вступают в действие только после того, как скорость вращения авиадвигателя становится больше некоторого предельного значения. К этим источникам энергии относятся электрические генераторы, приводимые во вращение от вала авиадвигателя.

Ко второй категории относятся источники электрической энергии, действующие независимо от скорости вращения авиадвигателя. К этой категории так называемых резервных источников относятся авиацион-

ные аккумуляторы и двигатель-генераторные установки (агрегаты) с автономным первичным двигателем.

Во время полета, когда скорость вращения авиадвигателей велика, энергоснабжение обеспечивается основными источниками электрической энергии. В начале и в конце полета, когда скорость вращения авиадвигателей невелика, а также на стоянке энергоснабжение обеспечивается резервными источниками. Наконец, в некоторых случаях может возникнуть необходимость в одновременном использовании как основных, так и резервных источников электрической энергии. В этих условиях выбор основных источников энергии на самолете, т. е. авиационных генераторов, приводимых от авиадвигателей, не может быть произведен в отрыве от выбора резервных источников.

Правильный выбор источников электрической энергии на самолете может быть произведен только на основании анализа графика нагрузок источников электрической энергии в процессе эксплуатации самолета.

Графиком нагрузок источников электрической энергии называется кривая, представляющая собой зависимость нагрузки (в ваттах или амперах) источников от времени полета. Для получения этого графика нагрузок на самолете следовало бы установить прибор, регистрирующий суммарную нагрузку источников электрической энергии. Кривая, вычерчиваемая этим прибором, и являлась бы графиком электрических нагрузок. На практике график электрических нагрузок источников электрической энергии строят расчетным путем.

Для этого все время полета разбивается на отдельные промежутки времени (этапы полета), в течение которых можно приблизительно считать общую нагрузку постоянной. После этого суммируется мощность всех потребителей, работающих на отдельных этапах, и в прямоугольной системе координат изображается зависимость мощности (или тока) от времени полета. Благодаря принятому допущению о постоянстве мощности на отдельных этапах полета график электрических нагрузок представляет собой ступенчатую кривую (фиг. 14.1). Очевидно, что для одного и того же самолета при заданной установленной мощности потребителей можно построить бесчисленное множество отличных друг от друга графиков электрических нагрузок, вид которых будет зависеть от характера предполагаемого полета и порядка работы отдельных потребителей.

Из всех возможных графиков электрических нагрузок для выбора источников электрической энергии следует брать график наиболее тяжелый для источников. Однако при выборе наиболее тяжелых графиков нагрузок не следует переходить разумных границ, т. е. график нагрузки должен быть реальным. Универсальных методов для выбора наиболее тяжелых режимов полета не существует. Все зависит от типа самолета, его назначения, характера предполагаемых полетов, поставленных перед экипажем заданий и т. д. Поэтому в каждом конкретном случае режим и условия полета, наиболее тяжелые с точки зрения графика нагрузки, устанавливаются на основании тщательного анализа всех перечисленных выше факторов.

В качестве ориентировочных рекомендаций, приводимых здесь лишь как пример, можно указать следующие наиболее тяжелые режимы полета для типовых самолетов.

Для дальних тяжелых бомбардировщиков — высотный ночной полет над территорией противника с бомбометанием и одновременным ведением огня.

Для истребителей — ночной воздушный бой, когда после выхода из боя включаются все радиосредства, посадочные устройства, электропри-

потребляемая каким-либо электромеханизмом за рабочий цикл, является весьма неравномерной (например, электрические стартеры, электропривод шасси и т. д.). В таких случаях следует брать среднеквадратичное значение потребляемой электромеханизмом мощности $P_{эфф}$. Среднеквадратичную мощность можно найти, если заданы нагрузочные диаграммы потребителя или кривые, изображающие изменения тока и напряжения у потребителя в зависимости от времени.

Для вращательного движения

$$P_{эфф} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{M}{\eta} \omega \right)^2 dt}. \quad (14.1)$$

Для поступательного движения

$$P_{эфф} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{Fv}{\eta} \right)^2 dt}. \quad (14.2)$$

Если известны ток и напряжение, то

$$P_{эфф} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (Ui)^2 dt}, \quad (14.3)$$

где T — продолжительность работы потребителя;
 ω — угловая скорость вращения;
 η — коэффициент полезного действия двигателя;
 M — момент нагрузки на валу двигателя;
 F — тяговое усилие;
 v — линейная скорость движения;
 U — напряжение на зажимах потребителя;
 i — ток нагрузки.

Такой подсчет потребляемой мощности целесообразно выполнять лишь для потребителей средней и повышенной мощности. Для потребителей малой мощности можно брать номинальное значение мощности, имея в виду, что при этом будет получаться некоторый запас, т. е. некоторое завышение мощности по графику нагрузки над ее действительной величиной.

Перед построением графика электрических нагрузок источников энергии на самолете составляется таблица потребителей электрической энергии в такой форме, которая максимально облегчает построение графика нагрузок. Одним из возможных вариантов таких таблиц может служить табл. 14. 1.

Таблица 14.1

Таблица потребителей электрической энергии

№ по пор.	Наименование потребителей	Этапы полета									
		Мощность одного потребителя	Число потребителей	Общая мощность одноименных потребителей	Коэффициент одновременности	Суммарная мощность одновременно работающих потребителей	Характер работы потребителя	Продолжительность времени работы (наибольшая)	Подготовка к полету	Рулежка	Взлет и набор высоты
									Полет над своей территорией	Полет над территорией противника	Воздушный бой и бомбометание
									Полет над территорией противника	Полет над своей территорией	Снижение и посадка
									Рулежка	Осмотр после полета	

В первую графу этой таблицы рекомендуется заносить наименования потребителей электрической энергии в таком порядке:

- 1) силовые электромеханизмы;
- 2) электрифицированное вооружение;
- 3) радиооборудование;
- 4) осветительные, обогревательные и светосигнальные устройства;
- 5) электрические контрольно-измерительные приборы и указатели;
- 6) прочие потребители электрической энергии.

В следующую графу заносится мощность каждого потребителя. Здесь проставляется номинальная мощность электромеханизма для потребителей с более или менее спокойным режимом работы и маломощных потребителей и эффективная мощность для мощных потребителей с резко неравномерной нагрузкой за рабочий цикл.

Далее идут графы, в которые заносят число одноименных потребителей и общую мощность потребителей, которая получается умножением числа одноименных потребителей на мощность одного потребителя.

В следующих графах проставляются коэффициент одновременности, суммарная мощность одновременно работающих потребителей, получаемая умножением коэффициента одновременности на общую мощность потребителей, характер работы потребителя (длительный, кратковременный, повторно-кратковременный) и наибольшая продолжительность времени рабочего цикла потребителя.

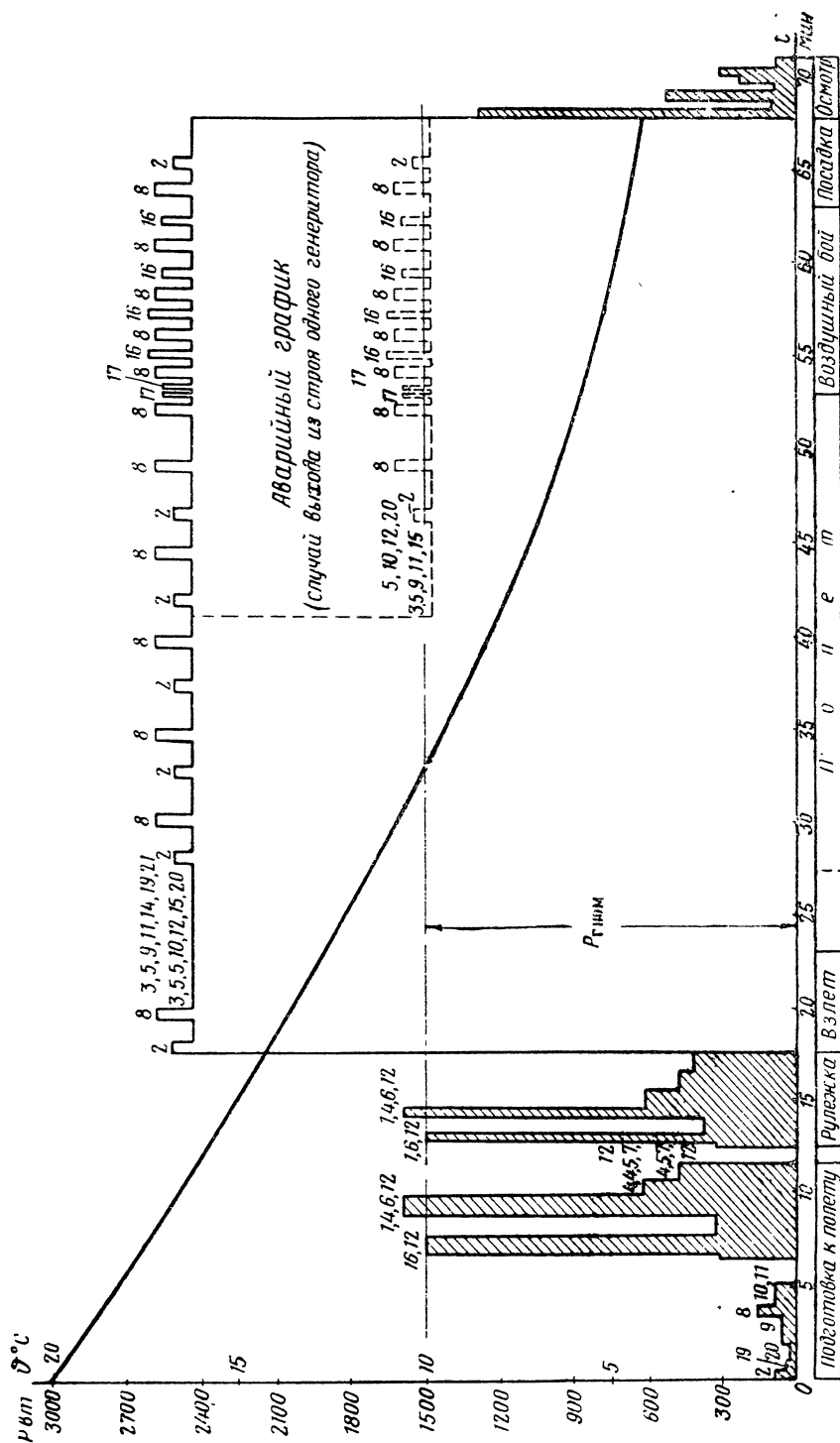
Последующие графы относятся к этапам полета, их число и последовательность зависят от избранного наиболее тяжелого для источников электроэнергии режима полета. В этих графах проставляется время работы потребителя на отдельных этапах полета. При этом целесообразно отдельные этапы полета брать более или менее значительными, охватывающими тот или иной режим полета (рулежка, старт, взлет, полет над территорией противника и т. д.), так что в интервале каждого этапа полета имеется ряд промежутков времени, в течение которых нагрузка источников электроэнергии остается постоянной.

После составления и заполнения таблицы потребителей электрической энергии переходят к построению графика нагрузок по этапам. При построении графика нагрузок целесообразно сначала нанести на него суммарную мощность тех потребителей, которые включены во время всего полета, а затем уже добавлять мощность потребителей, периодически включаемых на отдельных этапах полета.

В случае если все подготовительные к полету операции производятся за счет аэродромных источников электрической энергии и проведение этих операций от бортовых источников не предусмотрено, график нагрузок следует начинать строить с того момента времени, когда вступают в действие основные источники электрической энергии самолета (т. е. с момента запуска авиадвигателей). Если же проведение подготовительных к полету операций предусмотрено от бортовых (резервных) источников питания, то на графике нагрузок указывается мощность, потребляемая от этих источников. Энергия, получаемая от резервных источников электрической энергии, на графике нагрузок выделяется обычно штриховкой, как это изображено на фиг. 14.1 и 14.2.

Продолжительность работы потребителей электрической энергии на отдельных этапах полета и последовательность их работы определяются типом самолета и характером полета.

В некоторых случаях продолжительность и последовательность работы тех или иных потребителей электрической энергии регламентируется специальными инструкциями и тактико-техническими требованиями



Фиг. 14.2. График электрических нагрузок для двухмоторного истребителя с реактивными двигателями.

1—электростартер для запуска пускового двигателя, 2—электроуправление триммером руля высоты, 3—электроуправление конусом сопла, 4—электроуправление пускового насоса, 5—электроуправление керосинового насоса, 6—пусковая катушка стартера, 7—пусковая катушка реактивного двигателя, 8—передатчик радиостанции, 9—радиоприемник, 10—радиополукомпас, 11—радиолокационный

прибор, 12—питание дистанционных приборов, 13—АНО, 14—лампы подсвета, 15—освещение прицела, 16—электропуск пушки, 17—электроклапан переа-рядки пушки, 18—соленоид обогащения горючего, 19—обогрев трубки Пито, 20—обогрев часов, 21—лампы сигнала сигнализации шасси, 22—кабинное осве-щение.

к электрооборудованию самолетов, с которыми необходимо познакомиться перед построением графика нагрузок.

В качестве примера ниже приведены ориентировочные данные о продолжительности включения некоторых потребителей электрической энергии во время полета.

Для дальних бомбардировщиков с поршневыми двигателями при построении графика нагрузок принимают обычно продолжительность работы силовых установок вооружения по 5 мин. 4 раза за полет, работу электростартера рассчитывают на 3—4 запуска продолжительностью по 15—30 сек. каждый с перерывом между запусками по 5 мин., время работы электромеханизмов шасси и закрылков берут по 1 мин. Посадочные фары включают при рулежке до взлета и при посадке и рулежке после посадки на 5 мин. (все одновременно). Работа радиопередатчиков предусматривается периодической — (10—15%) от времени работы приемников. Приведенные выше цифры не следует рассматривать как какие-то нормы. В каждом конкретном случае эти цифры должны быть установлены после знакомства с тактико-техническими требованиями к проектированию электрооборудования самолетов, правилами эксплуатации электрооборудования и тщательного анализа всех возможных режимов полета проектируемого самолета.

После того как график электрических нагрузок источников электрической энергии построен, переходят к выбору самих источников.

§ 14.2. ВЫБОР ОСНОВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Число основных источников электрической энергии с точки зрения наибольшей надежности и симметрии нагрузки авиадвигателей целесообразно принимать равным числу авиадвигателей, установленных на самолете.

На современных тяжелых самолетах с большим потреблением электрической энергии суммарная мощность основных источников электрической энергии (генераторов) выбирается так, чтобы все пики нагрузок во время полета покрывались за счет использования перегрузочной способности основных генераторов.

На самолетах с относительно малым потреблением электрической энергии, когда аккумуляторная батарея может быть использована в качестве резервного источника электрической энергии, основные источники выбирают с учетом того, что пики нагрузок, превышающие полуторакратную мощность основных источников энергии, должны покрываться аккумуляторными батареями, как это изображено на фиг. 14.1. Выбор основных источников производится путем ориентировочного подбора ближайшего из серийных самолетных генераторов и последующей проверки его мощности по графику нагрузок.

Ориентировочно подобрать ближайший серийный генератор можно следующим образом. Сначала определяют приблизительно площадь графика нагрузок источников электрической энергии. Эта площадь представляет собой в некотором масштабе всю энергию, расходуемую за время полета. Затем находят среднюю потребляемую мощность на один генератор по формуле

$$P_{\text{ср}} = \frac{A}{nt_{\text{пол}}}, \quad (14.4)$$

где A — энергия, расходуемая за время полета (определяется как площадь графика нагрузок);

n — число генераторов;

$t_{\text{пол}}$ — продолжительность полета;

$P_{\text{ср}}$ — средняя мощность генератора.

Затем, учитывая возможность неравномерного распределения нагрузки между параллельно работающими генераторами, по шкале серийных самолетных генераторов выбирают генератор номинальной мощностью 125—150 % от найденной величины средней мощности генератора. После этого по графику нагрузки определяют возможность применения этого генератора. Генератор пригоден, если за время полета при выбранном наиболее напряженном режиме он не перегреется выше допустимой величины. Для этого необходимо подсчитать температуру нагрева генератора на каждом этапе полета, учитывая его предшествующий нагрев. Если в результате этого расчета окажется, что нагрев генератора не превосходит допустимого предела, то мощность выбранного генератора достаточна для обеспечения заданного графика нагрузки, в противном случае необходимо выбирать генератор большей мощности. Однако практически выполнить такой расчет не всегда возможно ввиду трудности точной оценки коэффициентов теплоотдачи генератора, которые зависят от очень большого числа факторов: температуры, плотности атмосферного воздуха, влажности, скорости полета, условий вентиляции и т. д. Поэтому возможность применения ориентировочно подобранного генератора проверяют более просто с некоторым запасом с точки зрения нагрева генератора до допускаемой нормальной температуры.

Способ этот заключается в следующем.

Определяют суммарную мощность генераторов, для чего ориентировочно подобранную мощность генератора умножают на число генераторов на самолете. На графике нагрузки проводят линию, параллельную оси абсцисс, на расстоянии от нее, равном полуторной величине суммарной мощности генераторов. Если эта прямая пересекает график нагрузки на участке, соответствующем времени, допустимому для данного генератора при его работе с перегрузкой, например, 2 мин. и больше, или если эта прямая пересекает график нагрузки более чем 3—4 раза за 1 час, то мощность генератора не обеспечивает заданного графика нагрузки. Другими словами, если генератор будет работать с полуторной перегрузкой более 2 мин. или если он будет перегружаться более 3—4 раз за час, то мощность такого генератора недостаточна для данного графика нагрузки, и следует выбирать ближайший больший по мощности серийный самолетный генератор.

Аналогично производится проверка правильности выбора генераторов при работе их с допустимыми перегрузками, большими полуторакратной.

Следует иметь в виду, что при таком выборе мощности генераторов не учитывается мощность потерь в самолетной электрической сети, которая может достигать 8—10 % от суммарной мощности генераторов. Поэтому мощность генераторов должна быть взята с некоторым запасом, обеспечивающим покрытие потерь в самолетной электрической сети.

При наличии на самолете максимальных реле пика нагрузки свыше полуторакратной автоматически переключаются на аккумулятор.

§ 14. 3. ВЫБОР РЕЗЕРВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Выбор аккумуляторной батареи производится в зависимости от ее назначения. Аккумуляторные батареи могут иметь следующее назначение:

а) обеспечивать автономный запуск авиадвигателей;

нагрузки (графа 4) на продолжительность разряда (графа 2). В шестую графу помещается температура электролита. Температура электролита может быть рассчитана по формуле:

$$\vartheta = \vartheta_{\kappa} + (\vartheta_{\text{н}} - \vartheta_{\kappa}) e^{-\frac{t}{T_{\text{конт}}}}, \quad (14.5)$$

где ϑ_{κ} — температура окружающей среды;

$\vartheta_{\text{н}}$ — начальная температура электролита;

$T_{\text{конт}}$ — постоянная времени аккумулятора с контейнером;

t — время полета.

Температуру электролита для удобства расчетов наносят иногда прямо на графике нагрузок, как это изображено на фиг. 14.2 жирной линией.

Температура электролита необходима в дальнейшем для расчета остаточной емкости батареи.

Температура электролита при эксплуатации аккумуляторных батарей не должна быть ниже $0 \div -5^{\circ}\text{C}$, так как в противном случае аккумулятор теряет большую часть емкости и имеет плохие стартерные характеристики.

В седьмую графу заносится остаток емкости от предыдущего этапа полета. Для первого этапа в седьмой графе ставится цифра 70, из предположения, что в начале работы батарея частично разряжена.

Для второго этапа в седьмую графу заносится разность между цифрой 70 и процентной убылью емкости за первый этап и т. д.

В восьмой графе представляется приведенная номинальная емкость аккумуляторной батареи при данной температуре электролита и разрядном токе. Эта графа заполняется лишь для тех этапов, в которые батарея разряжается. Емкость аккумулятора при пониженной температуре определяется по формуле

$$Q_t = Q_{20} [1 + 0,01 (\vartheta - 20)], \quad (14.6)$$

где Q_t — емкость при температуре ϑ ;

Q_{20} — емкость при температуре 20°C .

Емкость аккумулятора при разрядном токе I_r можно найти, зная номинальную емкость аккумулятора $Q_{\text{ном}}$ при номинальном разрядном токе $I_{\text{ном}}$, по формуле (1.21).

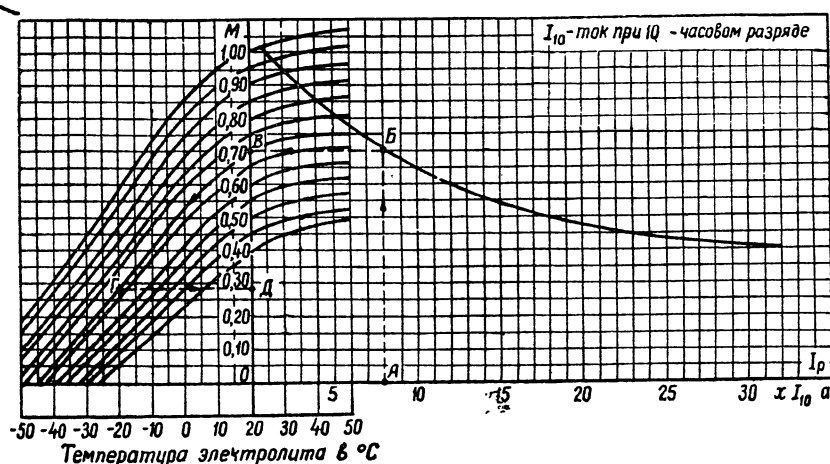
Для более быстрого определения емкости батареи в зависимости от режима работы и температуры расчет удобнее проводить по номограммам.

Одна из таких номограмм приведена на фиг. 14.3. Эта номограмма позволяет определить коэффициент уменьшения емкости M аккумуляторной батареи при данных токе и температуре электролита. Значение коэффициента M определяют по диаграмме фиг. 14.3 следующим образом. По оси абсцисс находят силу разрядного тока в амперах (например, точка A), соответствующую разрядному режиму батареи; определяют ординату кривой, расположенной в правой части диаграммы, соответствующую этой силе разрядного тока (точка B), тогда на оси ординат (точка B) получается значение M при температуре электролита 20°C ; для определения значения M при другой температуре используются кривые левой части диаграммы, по которым (или между которыми) ведут линию до пересечения с ординатой, соответствующей другой температуре (например, до точки Γ , если температура электролита -20°C); ордината точки пересечения дает искомое значение M при другой температуре (см. точку D для взятого примера). Произведение этого коэффициента M на номинальную емкость аккумуляторной батареи дает значение приведенной номинальной емкости для восьмой графы.

В девятой графе проставляется величина отданной или полученной емкости аккумуляторной батареи в процентах. Данные этой графы могут быть получены делением данных графы 5 на данные графы 8 и умножением результата на 100.

В случае если на рассматриваемом этапе батарея подзаряжается, данные для графы 9 можно получить из номограмм, приводимых в инструкциях по аккумуляторам.

Наконец, в графе 10 проставляется величина остаточной емкости к концу этапа в процентах от номинальной емкости аккумуляторной батареи. Если в результате приведенного расчета аккумуляторной батареи остаточная емкость в конце полета будет меньше 20%, то следует выбирать аккумулятор большей емкости. Однако может оказаться, что



Фиг. 14.3. Номограмма для расчета разрядной емкости аккумулятора.

в результате такого расчета аккумуляторная батарея получается слишком большой емкости, а следовательно, слишком громоздкой и тяжелой. В таком случае следует выбрать мощность основных источников электроэнергии — авиационных генераторов — на ступень больше, для того чтобы облегчить работу аккумуляторной батареи при пиках нагрузки.

Некоторой особенностью отличается выбор аккумуляторных батарей для реактивных самолетов.

В этом случае основным назначением аккумуляторных батарей является обеспечение 4—5-кратного запуска реактивных двигателей. Исходя из этих условий и учитывая систему запуска производят выбор емкости, типа и количества аккумуляторных батарей. Расчет можно производить аналогично описанному выше способу, причем остаточная емкость батареи после 4—5 запусков при самых коротких интервалах между ними не должна быть меньше 20% от номинальной.

Перед аккумуляторной батареей в этом случае не ставится обычно задача покрывать пики нагрузки. Покрывание пиков нагрузки обеспечивается соответствующим выбором основных источников электроэнергии, так что батарея подзаряжается во все время полета.

В случае когда роль резервных источников электроэнергии выполняют двигатель-генераторные установки с автономным первичным двигателем, порядок выбора источников электроэнергии несколько изменяется. Основные источники электроэнергии выбираются с точки зрения обеспечения всех возможных пиковых нагрузок.

Мощность самолетного генератора выбирается в этом случае такой, чтобы все пиковые нагрузки по графику нагрузки покрывались за счет перегрузочной способности генератора. Ориентировочный выбор мощности генератора можно производить по формуле

$$P_r = \frac{P_{\max}}{1,5nk}, \quad (14.7)$$

где $P_{\max}$ — максимальная пиковая нагрузка, взятая из графика нагрузки;
 n — число генераторов;
 k — коэффициент, учитывающий неравномерность нагрузки генераторов.

После выбора ближайшего по мощности серийного генератора его проверяют по графику нагрузки, аналогично тому как это уже было указано в § 14.2, т. е. необходимо обеспечить такую работу генератора, чтобы он не работал при 150% перегрузке дольше, чем допускается для него, и чтобы такая перегрузка не повторялась более чем 3—4 раза в час. На фиг. 14.2 приведен график нагрузки для двухмоторного реактивного истребителя.

Для выбора мощности генератора двигатель-генераторной установки строят график нагрузки на резервный генератор исходя из наиболее тяжелого возможного режима его работы. При этом нужно исходить из назначения резервного агрегата. Резервный агрегат должен обеспечить раздельное опробование потребителей на земле, а также работу всех потребителей, используемых при рулежке, на старте, при планировании и всех режимах, где резко изменяется скорость вращения авиадвигателей или скорость вращения авиадвигателей недостаточна для работы основных генераторов. Графики нагрузки на резервный генератор строятся аналогично построению графика нагрузки на основные генераторы. Составляется таблица потребителей, питаемых от резервного генератора, и строится график нагрузки.

После этого определяется ориентировочно мощность генератора и проверяется по графику нагрузки. Пики нагрузки свыше полутора-кратной должны покрываться аккумуляторной батареей, работающей параллельно с резервным генератором. Емкость аккумуляторной батареи выбирают из условий обеспечения 3—4-кратного запуска резервного агрегата.

§ 14.4. АВАРИЙНЫЕ ГРАФИКИ НАГРУЗОК, ГРАФИКИ НАГРУЗОК НА СИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ И ГРАФИКИ НАГРУЗОК ДЛЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Кроме основного графика нагрузки, описанного выше, обычно строится еще так называемый аварийный график нагрузки, служащий для проверки обеспечения электроэнергией минимума жизненно необходимых потребителей при аварии с одним или несколькими основными источниками питания. Построению аварийного графика нагрузки, так же как и основного, должно предшествовать составление таблицы потребителей, которые должны работать после аварии.

Так же, как и при построении основного графика нагрузки, аварийный полет разбивается на этапы, после чего строится график.

Аварийный график нагрузки можно строить на том же чертеже, на котором построен основной (см., например, пункт на фиг. 14.2).

В случае если в качестве резервного источника энергии используется аккумулятор, необходимо произвести расчет остаточной емкости аккумулятора способом, описанным выше.

Этот расчет от описанного выше отличается тем, что аккумулятор в данном случае только разряжается, а подзарядка его отсутствует. При этом остаточная емкость аккумулятора после посадки должна быть достаточной для работы связной радиостанции в течение 10—15 мин.

Для расчета времени работы полуразряженной батареи можно воспользоваться следующей формулой:

$$t = \frac{MQ_a}{I_p}, \quad (14.8)$$

где t — время работы аккумулятора;

Q_a — емкость (остаточная) батареи;

M — коэффициент уменьшения емкости батареи при токе I_p (определяется по номограммам фиг. 14.3);

I_p — ток разряда батареи.

Если в качестве основных источников электрической энергии на самолете используются синхронные генераторы, то выбор мощности синхронных генераторов должен также производиться на основе анализа графика электрических нагрузок. При построении графика электрических нагрузок самолетных синхронных генераторов необходимо учитывать коэффициент мощности потребителей электрической энергии. Так же как и при построении графика электрических нагрузок самолетных генераторов постоянного тока, необходимо составить предварительно таблицу потребителей электрической энергии, которая отличается от приведенной выше таблицы лишь введением трех дополнительных граф: графы, в которой проставляется $\cos \varphi$ потребителя, графы для активной мощности потребителя и графы для реактивной мощности потребителя.

Затем по отдельности суммируются активные и реактивные мощности потребителей на каждом этапе полета. Общая кажущаяся или полная мощность всех потребителей определяется по формуле

$$P = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{i=n} P_{ai}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{i=n} P_{pi}\right)^2}, \quad (14.9)$$

где P — кажущаяся мощность всех потребителей;

$P_{ai} = P_i \cos \varphi_i$ — активная мощность потребителя на i -том этапе;

$P_{pi} = P_i \sin \varphi_i$ — реактивная мощность потребителя на i -том этапе.

При построении графика нагрузок на одном и том же графике строят диаграммы изменения кажущейся и активной мощностей по этапам полета. Построение графика электрических нагрузок для кажущейся и активной мощностей является наиболее целесообразным, так как позволяет получить из графика нагрузки как величину полного тока (делением кажущейся мощности на среднее напряжение сети), необходимую для расчета электрической сети самолета, так и величину $\cos \varphi$ на данном этапе полета делением активной мощности на кажущуюся.

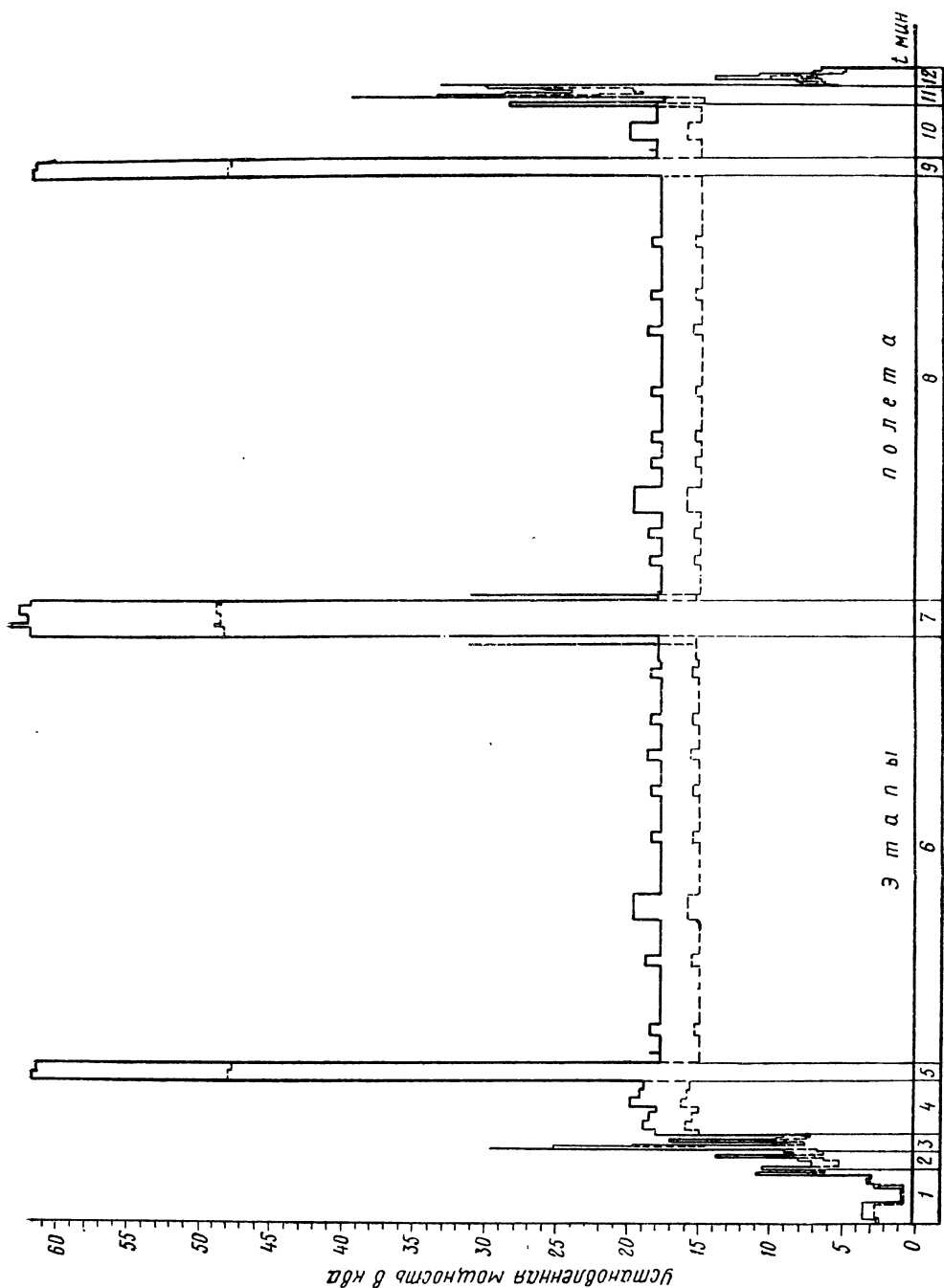
На фиг. 14.4 приведен график электрических нагрузок на самолетные синхронные генераторы для тяжелого четырехмоторного бомбардировщика. Сплошной линией изображен график кажущейся мощности, пунктирной линией — активной мощности.

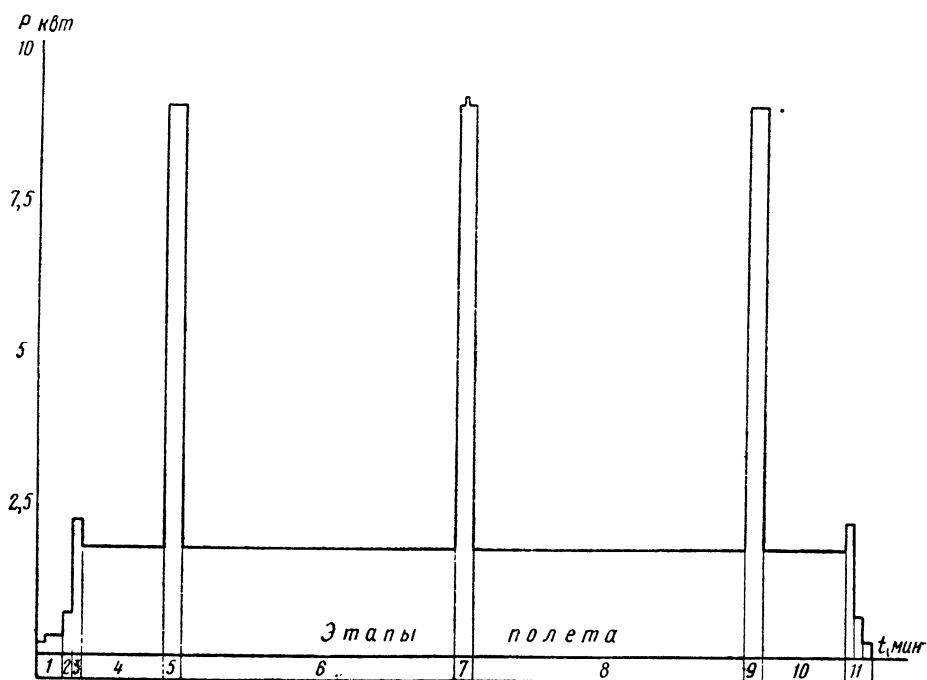
Следует иметь в виду, что при построении графика нагрузок для получения суммарной кажущейся мощности на данном этапе полета необходимо сначала просуммировать все активные мощности, затем все реактивные, после чего осуществить их геометрическое сложение по формуле (14.9).

Выбор мощности синхронных генераторов после построения графика электрических нагрузок аналогичен рассмотренному выше выбору мощности источников постоянного тока. Так как провода самолетной элек-

Фиг. 14. 4. График электрических нагрузок для бомбардировщика, оборудованного на переменном токе.

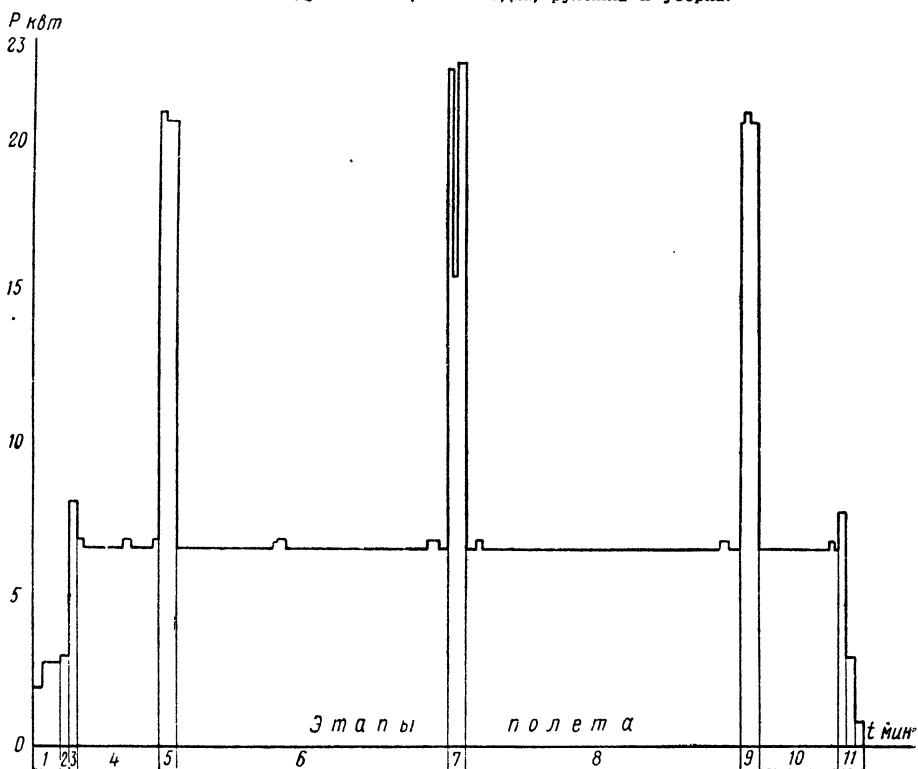
1—подготовка к полету, 2—рулежка и старт, 3—взлет и набор высоты, 4 и 10—полет над своей территорией, 5 и 9—воздушный бой, 6 и 8—полет над территорией противника, 7—бомбометание и воздушный бой, 11—снижение и посадка, 12—рулежка и уборка.





Фиг. 14.5. График электрических нагрузок для хвостового ЦРУ.

1—подготовка к полету, 2—рулежка и старт, 3—взлет и набор высоты, 4 и 10—полет над своей территорией, 5 и 9—воздушный бой, 6 и 8—полет над территорией противника, 7—бомбометание и воздушный бой, 11—посадка, рулежка и уборка.



Фиг. 14.6. График электрических нагрузок для бортового питательного провода.

1—подготовка к полету, 2—рулежка и старт, 3—взлет и набор высоты, 4 и 10—полет над своей территорией, 5 и 9—воздушный бой, 6 и 8—полет над территорией противника, 7—бомбометание и воздушный бой, 11—посадка, рулежка и уборка.

трической сети нагреваются полным (кажущимся) током, то необходимо предусмотреть соответствующий запас мощности генераторов на потери энергии в сети.

Помимо графиков электрических нагрузок источников электрической энергии, в ряде случаев строятся также графики электрических нагрузок тех или иных самолетных распределительных устройств и проводов питательной сети. Потребность в таких графиках нагрузок возникает при проектировании и электрическом расчете питательной сети и распределительных устройств самолета. При построении графиков нагрузок распределительных устройств и питательных проводов используется график электрических нагрузок источников питания, из которого берутся данные для этого построения.

В качестве примера на фиг. 14.5 приведен график электрических нагрузок хвостового центрального распределительного устройства (ЦРУ), а на фиг. 14.6 — график электрических нагрузок бортового питательного провода для фронтового бомбардировщика.

Глава XV

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

§ 15.1. НАЗНАЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Для обеспечения электрической энергией всех самолетных потребителей необходимо иметь на самолете промежуточное связующее устройство, с помощью которого осуществляется передача к потребителям электрической энергии, вырабатываемой самолетными генераторами.

Таким промежуточным устройством является система передачи и распределения электрической энергии на самолете. Система передачи и распределения электрической энергии на самолете включает в себя электрическую сеть самолета, состоящую из электрических проводов и жгутов, коммутационную аппаратуру, служащую для управления потребителями и источниками электрической энергии, защитную аппаратуру, посредством которой осуществляется защита электрической сети и электрооборудования самолета от коротких замыканий и перегрузок, приборы контроля источников электрической энергии и сетевые фильтры. В систему передачи и распределения электрической энергии на самолете входит также всевозможное монтажное и установочное оборудование: сетевые разъемы, распределительные щиты и коробки, пульта управления и прочее вспомогательное оборудование.

Таким образом, система передачи и распределения электрической энергии на самолете служит для канализации электрической энергии, управления работой отдельных потребителей и генераторов и защиты всего электрооборудования самолета от коротких замыканий и перегрузок.

В связи со значительным ростом установленной мощности и числа потребителей и генераторов электрической энергии на современных самолетах проектирование систем передачи и распределения электрической энергии представляет собой довольно трудную задачу.

Сложность распределения и канализации тока на современном самолете усугубляется тем, что электрическая сеть должна быть сконцентрирована в весьма ограниченном пространстве, причем при проектировании и монтаже электрических сетей на самолетах должны быть соблюдены все требования в отношении надежности действия, техники безопасности, удобства обслуживания, малой уязвимости, минимального веса и т. д.

§ 15.2. ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМАМ ПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Важность и сложность функций, выполняемых системой передачи и распределения электрической энергии, и специфичность условий ее эксплуатации предъявляют к ней весьма высокие требования, выполнение

которых должно гарантировать надежность и безотказность снабжения потребителей на самолете электрической энергией.

К системе передачи и распределения электрической энергии предъявляются те же общие требования, что и к любому электрооборудованию самолета. Однако имеются также требования, специфические для системы передачи и распределения электрической энергии на самолете, к числу которых относятся:

а) максимальная живучесть, т. е. обеспечение бесперебойного питания потребителей при возможных аварийных режимах;

б) обеспечение высокого качества электрической энергии, получаемой потребителями;

в) удобство и безопасность в обслуживании; легкий доступ ко всем элементам системы передачи и распределения электрической энергии; безопасность в отношении возникновения пожара и взрыва, а также попадания обслуживающего персонала под напряжение. Требование максимальной живучести диктуется тем, что на современных самолетах повреждение системы передачи и распределения электрической энергии во время боевых действий является очень вероятным. Это следует и из того, что электрическая сеть пронизывает весь самолет и повреждение ее пулями и осколками снарядов неизбежно при попадании их в металлическую конструкцию самолета. Так как повреждения электрической сети могут привести к выходу из строя электрооборудования, от нормальной работы которого зависит возможность выполнения боевого задания, а в некоторых случаях и возможность продолжения полета, то очевидно, что электрическая сеть должна быть сконструирована и построена так, чтобы повреждения ее в отдельных местах не нарушали нормальной работы электрооборудования самолета.

Требование высокого качества электрической энергии, получаемой потребителями, вызвано тем, что многие потребители начинают ненормально работать или совсем выходят из строя, если напряжение на их зажимах оказывается ниже или выше заданных значений, или если частота тока для потребителей переменного тока отклоняется от номинального значения. Например, в осветительных устройствах резко снижается световой поток при понижении напряжения и сильно сокращается срок их службы при повышении напряжения.

При пониженном напряжении сильно нагруженные электрические двигатели могут остановиться и оказаться в режиме короткого замыкания и т. д.

Чрезмерное понижение напряжения на зажимах потребителей может быть вызвано, как будет видно дальше, неправильным проектированием электрической сети, большими переходными сопротивлениями контактов, несвоевременным отключением короткого замыкания и т. п.

§ 15.3. КЛАССИФИКАЦИЯ САМОЛЕТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

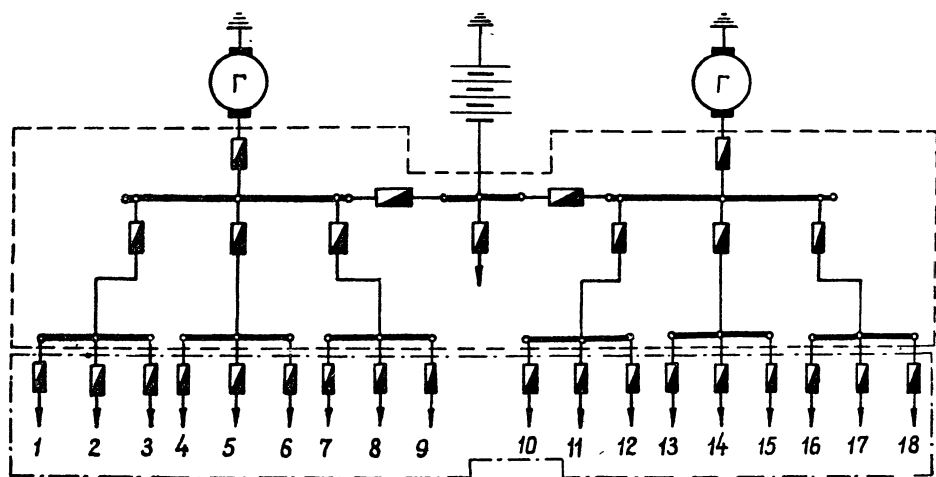
Выше указывалось, что основным элементом системы передачи и распределения электрической энергии является самолетная электрическая сеть, по проводам которой происходит канализация электрического тока от источников к потребителям электрической энергии.

Самолетные электрические сети могут быть классифицированы как по роду электрического тока, так и по величине номинального напряжения. По роду электрического тока самолетные электрические сети делятся на сети постоянного тока и сети переменного тока. По величине номинального напряжения самолетные электрические сети делятся на сети низкого напряжения и сети повышенного напряжения. В отличие от на-

земных электрических сетей, в которых к сетям низкого напряжения относятся сети с номинальным напряжением менее 250 в, к самолетным электрическим сетям низкого напряжения относятся сети с номинальным напряжением, равным или меньшим 30 в. Самолетные электрические сети с номинальным напряжением свыше 30 в относятся к сетям повышенного напряжения.

Электрическая энергия на самолете схематично распределяется следующим образом.

Электрическая энергия, выработанная самолетными генераторами, поступает по проводам сначала к распределительным устройствам, в качестве которых служат сборные шины, распределительные щиты, распределительные панели.



Фиг. 15. 1. Принципиальная схема питательной и распределительной сетей самолета.

Число распределительных устройств на самолете зависит от его типа и степени электрификации. На распределительных устройствах сосредотачивается обычно коммутационная и защитная аппаратура, служащая для управления потребителями и источниками электрической энергии самолета и для защиты электрической сети от коротких замыканий и перегрузок.

От распределительных устройств электрическая энергия поступает к отдельным потребителям. В соответствии с этим электрическая сеть самолета по назначению делится на питательную сеть, выполняющую функции передачи и распределения электрической энергии от источников к распределительным устройствам, и распределительную сеть, служащую для передачи и распределения электрической энергии от распределительных устройств к потребителям.

На фиг. 15. 1 изображена схема участков питательной и распределительной сетей самолета, где питательная сеть обведена пунктиром, а распределительная — штрих-пунктиром. На фиг. 15. 1 коммутационная аппаратура не изображена, а защитная аппаратура (предохранители, реле и пр.) с целью упрощения показана схематически в виде условного изображения предохранителей.

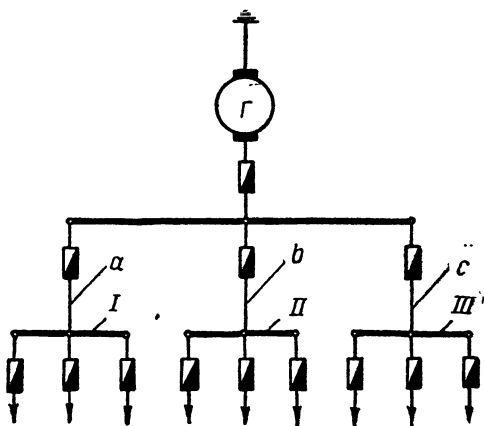
Участок распределительной сети, питающей группу потребителей от распределительного устройства через общий аппарат защиты, называется фидером. На фиг. 15. 1 фидеры обозначены цифрами 1—18.

Питательные электрические сети по техническому исполнению делятся на радиальные (разомкнутые) и замкнутые. Радиальными сетями называются такие, в которых к отдельным распределительным устройствам электрическая энергия подводится только с одной стороны.

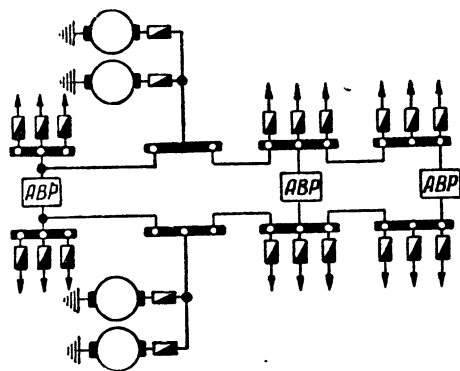
На фиг. 15.2 изображена схема радиальной сети. Здесь к распределительным устройствам *I*, *II* и *III* подвод энергии осуществляется лишь с одной стороны. Преимуществом радиальных сетей является малый расход проводникового материала и сравнительная легкость обеспечения защиты сети.

При проектировании самолетных электрических сетей особое внимание должно уделяться надежности работы сети и ее живучести.

Нетрудно видеть, что в радиальной сети повреждение (обрыв или короткое замыкание) в цепи питающего провода (например, *a* на



Фиг. 15.2. Принципиальная схема радиальной сети.



Фиг. 15.3. Принципиальная схема резервированной радиальной сети.

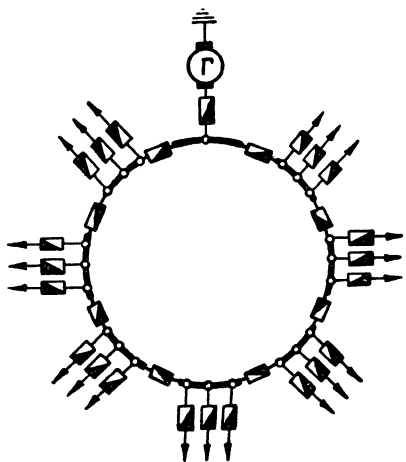
фиг. 15.2) прекращает снабжение всех потребителей, подключенных к распределительному устройству *I*, которое питалось от поврежденного провода. В этом заключается принципиальный недостаток радиальных сетей.

С целью устранения этого недостатка в радиальных сетях применяют иногда резервирование, позволяющее обеспечить питание всех потребителей в случае обрывов проводов или коротких замыканий. С этой целью источники электроэнергии разделяются на несколько независимых групп, каждая из которых питает свою систему шин. В случае потери питания одной из систем шин срабатывает автомат включения резерва (АВР) и подключает обесточенную систему шин к одной из исправных. На фиг. 15.3 изображена схема такой радиальной сети при наличии четырех источников питания. Здесь источники питания разбиты на две группы, каждая из которых питает свою систему шин. При нормальных условиях работы все АВР разомкнуты. В случае если на одном или нескольких распределительных устройствах пропадает питание, автоматически срабатывают соответствующие АВР, подавая питание на обесточенные распределительные устройства. Недостатком такой радиальной сети с резервированием является плохое использование резерва мощности генераторов, так как в нормальных условиях не все генераторы работают параллельно.

Замкнутыми сетями называются такие, в которых распределительные устройства получают питание по крайней мере с двух сторон.

На фиг. 15.4 изображена кольцевая замкнутая сеть с одним источником питания. Здесь каждое из распределительных устройств получает

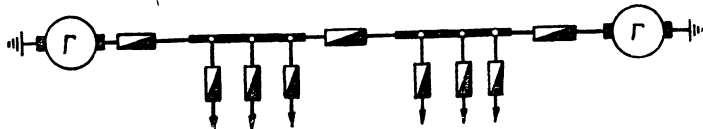
питание с двух сторон, что повышает надежность электроснабжения потребителей, так как при отключении одного из проводов, питающих распределительное устройство, остается второй питающий провод. К замкнутым сетям относится также сеть с двусторонним питанием (фиг. 15.5), частным случаем которой и является изображенная на фиг. 15.4 кольцевая замкнутая сеть (когда напряжения источников питания равны).



Фиг. 15.4. Принципиальная схема кольцевой замкнутой сети.

На фиг. 15.6 приведена схема многократно замкнутой электрической сети. Как видно, в такой сети некоторые распределительные устройства получают питание с трех сторон. Точки магистральной сети, которые могут питаться не менее чем с трех сторон, называются узловыми точками или узлами сети.

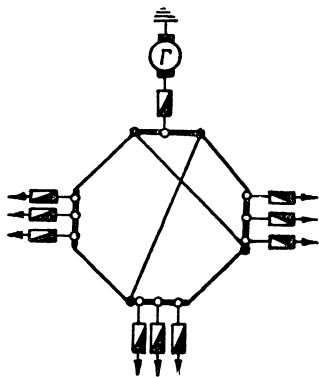
Приведенные на фиг. 15.4 и 15.6 системы замкнутых сетей не обеспечивают питания потребителей при аварии, произошедшей с источником электрической энергии. Более надежное снабжение энергией при замкнутой электрической сети достигается при наличии не одного, а нескольких источников электрической энергии.



Фиг. 15.5. Принципиальная схема сети с двусторонним питанием.

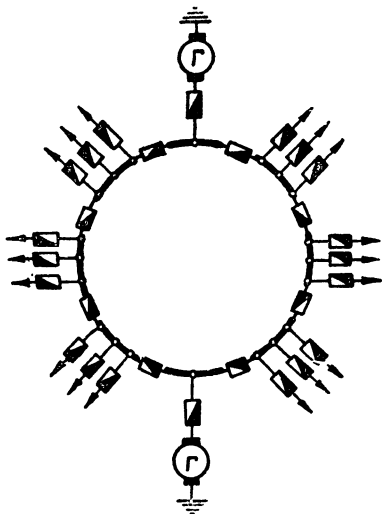
На фиг. 15.7 изображена кольцевая замкнутая сеть при наличии двух генераторов, а на фиг. 15.8 — многократно замкнутая сеть при наличии трех источников питания. Очевидно, такие сети с точки зрения надежности и малой уязвимости более предпочтительны, чем радиальные. Однако такому осуществлению замкнутых электрических сетей на самолете препятствует специфическое расположение генераторов электрической энергии. Генераторы электрической энергии на самолете располагаются в непосредственной близости от авиационных двигателей, т. е. в передней части самолета.

На фиг. 15.9 изображена схема расположения генераторов электрической энергии на многомоторном самолете. На той же фигуре в виде прямоугольников изображено схематическое расположение основных групп потребителей электрической энергии. Как видно из фиг. 15.9, источники электрической энергии расположены (если не считать аккумуляторной батареи) по одной линии в передней части самолета. Нетрудно видеть, что осуществление замкнутой питательной электрической сети с равномерным расположением источников в узлах в этом случае было бы связано с увеличением веса и объема электрической сети.

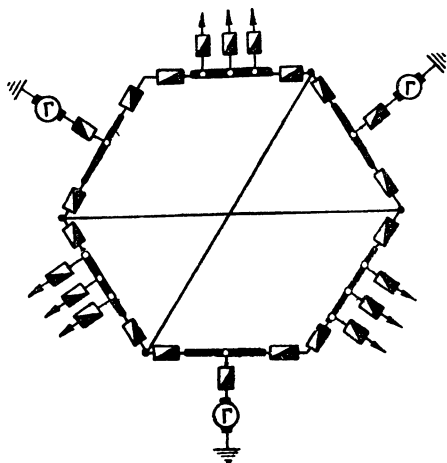


Фиг. 15.6. Принципиальная схема многократно замкнутой сети.

Это обстоятельство накладывает специфические особенности на замкнутые самолетные электрические сети. На фиг. 15.10 изображена схема многократно замкнутой самолетной электрической сети при наличии четырех источников питания. Здесь основное (магистральное) коль-



Фиг. 15.7. Принципиальная схема кольцевой замкнутой сети с двумя источниками питания.



Фиг. 15.8. Принципиальная схема многократно замкнутой сети с тремя источниками питания.

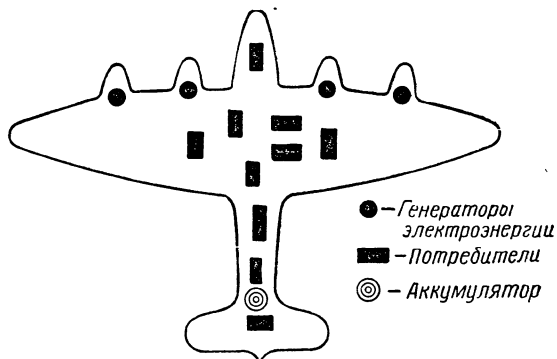
цо питательной сети прокладывается вдоль двух бортов самолета, а между отдельными распределительными узлами устанавливаются перемычки. Нагрузка на отдельные распределительные устройства устанавливается так, чтобы по возможности обеспечивалось равномерное распределение тока по обоим бортам самолета.

При всех достоинствах этой системы в отношении обеспечения бесперебойного питания при обрывах магистрального провода она обладает тем серьезным недостатком, что здесь невозможно обеспечить правильную работу защиты сети при коротких замыканиях.

На фиг. 15.11 изображен другой вариант замкнутой самолетной электрической сети.

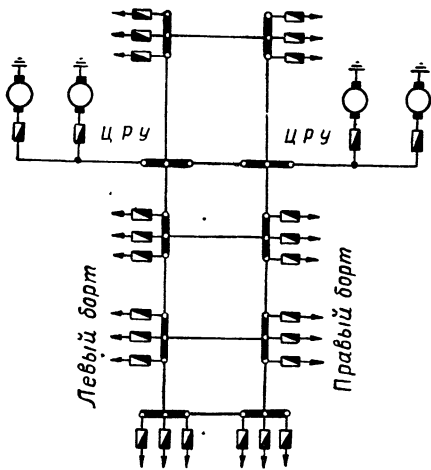
В системе питательной сети, изображенной на фиг. 15.11, легче обеспечить правильную работу защиты, чем в системе, изображенной на фиг. 15.10, однако с точки зрения веса проводов она может оказаться более тяжелой, чем питательная сеть, изображенная на фиг. 15.10.

Для обеспечения надежности и селективности работы защиты сети самолетную электрическую сеть целесообразно выполнять так, чтобы источники электрической энергии были равномерно подключены ко всем узлам сети. Один из возможных вариантов такой сети изображен на фиг. 15.12. Здесь три группы генераторов (по два в каждой группе)

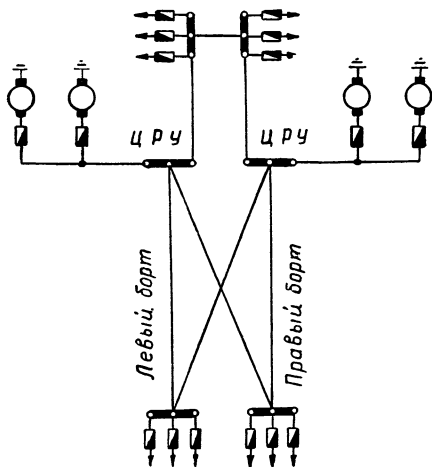


Фиг. 15.9. Схематическое расположение источников электрической энергии на самолете.

подключены к сторонам треугольника, образованного распределительными устройствами. Недостатком последнего варианта питательной электрической сети, как уже указывалось выше, является большой расход проводникового материала.



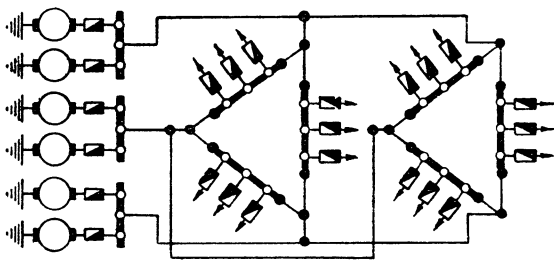
Фиг. 15.10. Принципиальная схема замкнутой самолетной сети (вариант 1).



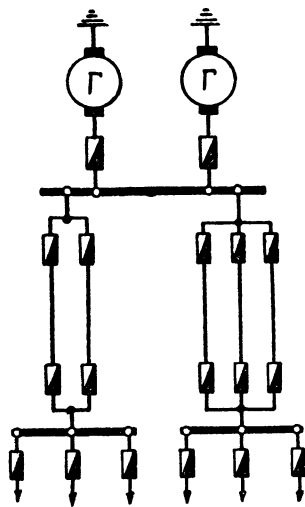
Фиг. 15.11. Принципиальная схема замкнутой самолетной сети (вариант 2).

Для надежного снабжения электрической энергией потребителей на самолетах применяется иногда так называемая многолинейная система питательных электрических сетей. При многолинейной системе к отдельным распределительным устройствам подходит несколько питающих проводов (несколько каналов), каждый из которых может осуществлять питание соответствующего распределительного устройства.

На фиг. 15.13 изображена принципиальная схема такой многолинейной радиальной электрической сети при наличии на самолете



Фиг. 15.12. Принципиальная схема замкнутой самолетной сети (вариант 3).



Фиг. 15.13. Принципиальная схема многолинейной сети.

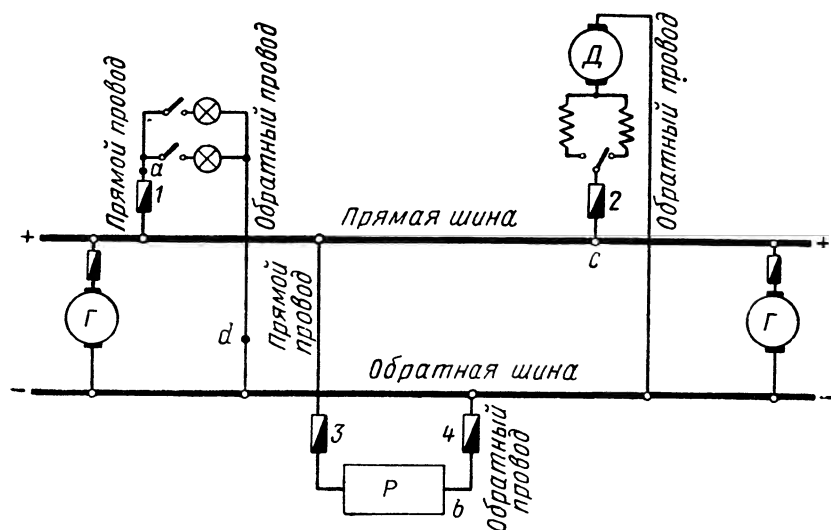
двух генераторов. При такой системе надежность и живучесть электрической сети возрастают, так как при выходе из строя одного из питающих проводов питание продолжает поступать по остальным проводам. Для меньшей уязвимости провода, подводящие питание к какому-либо распределительному устройству, обычно прокладываются на значительном рас-

стоянии друг от друга, с тем чтобы они не могли быть повреждены одновременно пулями или осколками снарядов.

К достоинствам многолинейной системы электрических сетей следует также отнести то, что применение ее позволяет уменьшить сечение проводов питающей сети; это в ряде случаев облегчает монтаж и позволяет повысить электрические нагрузки на провода.

§ 15.4. СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

На самолетах, на которых применяется постоянный ток, получили распространение две системы передачи электрической энергии от источников к потребителям: двухпроводная и однопроводная. Одна из них, двух-



Фиг. 15.14. Принципиальная схема двухпроводной системы передачи электрической энергии.

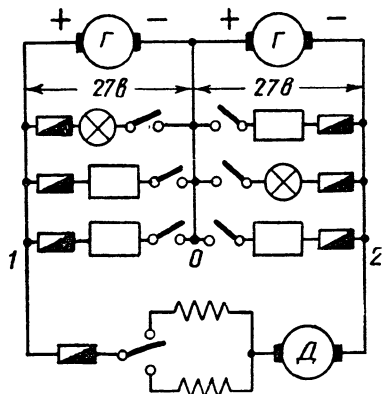
проводная система передачи электрической энергии, характеризуется тем, что к каждому потребителю и к каждому источнику электрической энергии подходят два провода, прямой и обратный, причем эти провода изолируются друг от друга, а также и по отношению к корпусу самолета. На фиг. 15.14 изображена принципиальная схема такой двухпроводной системы передачи электрической энергии.

Провод, идущий от плюсового зажима источника электрической энергии или от плюсовой шины, называется прямым проводом, а от минусового зажима или минусовой шины — обратным.

На ранней стадии развития самолетных электрических сетей применялась исключительно двухпроводная система передачи электрической энергии. Объясняется это, с одной стороны, отсутствием возможности использовать корпус самолета в качестве обратного провода, так как самолеты были деревянной или смешанной конструкции, с другой стороны, тем, что электрическая сеть самолетов была небольшой и малоразветвленной, так что при общем весе электрической проводки, достигавшем единиц или десятков килограммов, выигрыш в весе от перехода на однопроводную систему передачи был не столь существенным. По сравнению с однопроводной системой передачи электрической энергии двухпроводная

система обладает некоторыми преимуществами. Основные из этих преимуществ: большая надежность системы при коротких замыканиях проводов на корпус самолета и меньший уровень магнитных и электромагнитных помех, влияющих на показания приборов и работу радиоприемников.

При замыкании одного из проводов двухпроводной системы передачи электрической энергии на корпус, в случае когда на самолете нет потребителей, имеющих постоянное соединение из полюсов на корпус, система не выходит из строя. Система выйдет из строя или нормальная ее работа будет нарушена лишь при одновременном замыкании двух проводов, например, в точках *a* и *b* (см. фиг. 15.14) или в точках *c* и *d*.



Фиг. 15.15. Принципиальная схема трехпроводной системы передачи электрической энергии постоянного тока.

В первом случае перегорят предохранители 1 и 4, вследствие чего будет нарушена работа потребителей, во втором случае выйдет из строя вся электрическая сеть. Однако благодаря наличию на самолете потребителей, имеющих обратный провод, соединенный с металлической массой корпуса самолета, это преимущество двухпроводной системы передачи электрической энергии сводится на нет.

Вследствие того что прямой и обратный провода обычно идут рядом или на небольшом расстоянии друг от друга, магнитные и электромагнитные поля, создаваемые токами этих проводов, частично компенсируются, а это снижает уровень радиопомех и паразитных магнитных полей.

По мере роста числа потребителей электрической энергии на самолетах и увеличения протяженности самолетных электрических сетей вопросы уменьшения веса проводов электрической сети стали приобретать все более существенное значение. Поэтому с целью сокращения веса проводов электрической сети на некоторых самолетах стали объединять минусовые провода, идущие к одному месту. При этом образовалась так называемая двухпроводная система с общим минусом, являющаяся по существу первым шагом к переходу на однопроводную систему. Благодаря тому что в объединенных минусовых проводах токи всех присоединенных к ним потребителей никогда не протекали одновременно, сечение их можно было брать меньшим, чем сумма сечений всех отдельных объединенных проводов.

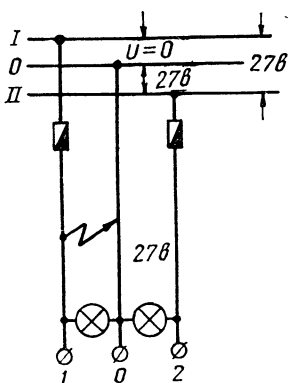
Некоторый интерес для самолетных электрических сетей может представить так называемая трехпроводная система передачи электрической энергии постоянным током или, как ее еще называют, система с нулевым проводом.

На фиг. 15.15 изображена принципиальная схема такой системы. Два самолетных генератора соединяются последовательно. От крайних зажимов и от общего среднего зажима отходит по одному проводу. Провод, идущий от среднего зажима, называется нулевым, а два других провода, из которых один положительный, а другой отрицательный, — крайними проводами. Потребители включают между нулевым проводом и одним из крайних. Если напряжение на зажимах генераторов равно 27 в, то напряжение между крайними проводами 54 в. Поэтому при наличии потребителей, рассчитанных на двойное напряжение источников питания, они могут включаться между крайними проводами.

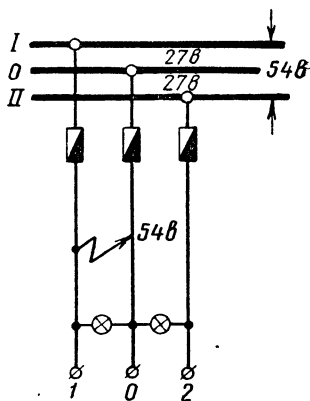
При равномерной нагрузке обеих половин этой системы ток в нулевом проводе отсутствует, и уравнительный ток появляется в нулевом проводе только в случае неравномерной нагрузки крайних проводов.

Защитной аппаратуры в нулевом проводе не должно быть. В противном случае при коротком замыкании между одним из крайних проводов и нулевым проводом и срабатывании только защиты нулевого провода все потребители, включенные между другим крайним проводом и нулевым, окажутся под двойным напряжением.

Это ясно из фиг. 15.16 и 15.17. При коротком замыкании между проводами 0 и I оба эти провода оказываются под одинаковым потенциалом. Если нулевой провод сохранил связь с генераторами (предохранитель в нулевом проводе отсутствует), то сборные шины 0 и I также замкнуты коротко, а между шинами 0 и II напряжение попрежнему равно 27 в (фиг. 15.16). При разрыве нулевого провода по какой-либо причине (прострел и пр.) и сохранении связи между проводом I и генераторами (предохранитель в проводе I не успел перегореть) напряжение между проводами 0 и 2 такое же, как между I и II (фиг. 15.17), и у потребителей установится двойное напряжение.



Фиг. 15.16. Схема правильного включения защитной аппаратуры.



Фиг. 15.17. Схема неправильного включения защитной аппаратуры.

Преимущество трехпроводной системы передачи электрической энергии заключается в значительной экономии проводов, так как при равномерной нагрузке обеих половин сети ток в нулевом проводе отсутствует, благодаря чему сечение его можно взять небольшим.

В качестве нулевого провода на самолете можно было бы использовать корпус, тогда такую систему по аналогии с однопроводной следовало бы называть двухпроводной системой передачи электрической энергии с заземленным нулевым проводом.

Однако на самолете эта система не получила распространения вследствие малой надежности и трудности осуществить равномерную нагрузку обеих половин сети. При выходе из строя одного генератора (см. фиг. 15.15) все потребители, включенные между крайним проводом этого генератора и нулевым проводом, лишаются питания.

Потребители электрической энергии на самолете могут включаться и выключаться в зависимости от режима полета, вследствие чего неравномерность нагрузки обеих половин сети неизбежна.

Вследствие роста установленных электрических мощностей на самолетах и увеличения в связи с этим протяженности самолетных электрических сетей вопросы уменьшения веса электрической сети приобрели решающее значение. Поэтому в настоящее время почти все современные самолеты имеют однопроводную систему передачи электрической энергии (фиг. 15.18). В качестве обратного провода здесь используется корпус самолета, благодаря чему удается значительно сократить вес проводов электрической сети.

Вторым преимуществом однопроводной системы передачи электрической энергии является то, что она сильно облегчает монтаж и упрощает схему электрической сети самолета. В эксплуатации однопроводная система передачи электрической энергии значительно удобнее, чем двухпроводная, так как к минусовому обратному проводу, т. е. к корпусу самолета, во всех случаях имеется свободный доступ.

К достоинствам однопроводной системы относится также то, что благодаря хорошей проводимости корпуса самолета падением напряжения в нем обычно можно пренебречь и считать, что уменьшение напря-

жения на зажимах потребителей получается только в результате потери напряжения в плюсовой цепи потребителя. При двухпроводной же системе необходимо считаться с потерей напряжения не только в плюсовой цепи, но и в минусовой.

К недостаткам однопроводной системы относится опасность коротких замыканий. Замыкание любого провода электрической сети самолета на корпус является коротким замыканием для всей электрической сети.

Другим недостатком этой системы является больший уро-

вень электромагнитных и магнитных помех, создаваемых токами в электрической сети самолета, по сравнению с таковыми в двухпроводной сети.

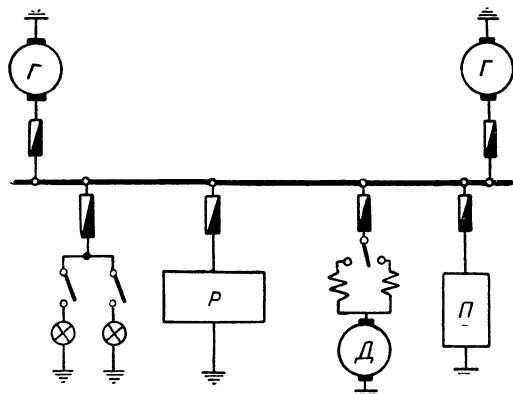
При применении однопроводной системы передачи электрической энергии на самолете необходимо принимать меры для надежного электрического контакта между отдельными частями самолета, так как по корпусу самолета могут протекать токи в тысячи ампер, которые при плохом контакте в стыкующихся частях конструкции самолета вызовут перегрев места контакта и нарушение нормальной работы сети. Необходимо также осуществлять надежное соединение минусовых цепей всех потребителей электрической энергии с корпусом самолета во избежание перегрева места контакта, который может привести к авариям.

§ 15.5. СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

При оборудовании электрической сети самолета на переменном токе в зависимости от числа фаз могут использоваться однопроводная, двухпроводная и трехпроводная системы передачи электрической энергии.

Если электрическая сеть самолета оборудуется на однофазном переменном токе, то возможные системы передачи электрической энергии остаются теми же, что и при передаче на постоянном токе. Все сказанное в отношении этих систем для постоянного тока остается в силе и для переменного тока. На ряде современных самолетов имеется вспомогательная сеть однофазного переменного тока, служащая для обеспечения электрической энергией потребителей переменного тока.

Обычно вспомогательная электрическая сеть переменного тока имеет однопроводную систему передачи электрической энергии, причем в качестве обратного провода используется корпус самолета. Корпус самолета

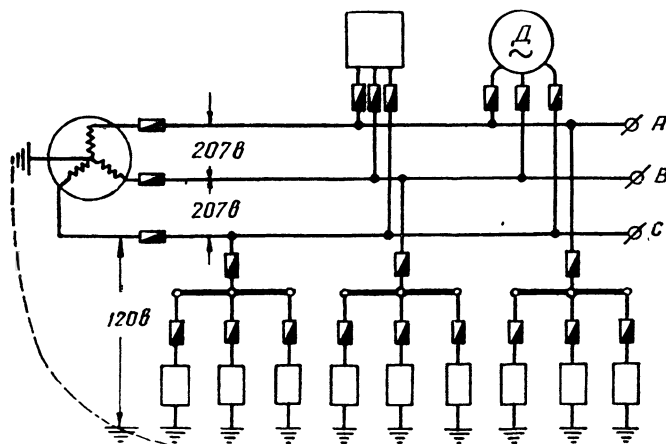


Фиг. 15.18. Принципиальная схема однопроводной системы передачи электрической энергии..

в этом случае является обратным проводом как для системы передачи электрической энергии постоянного тока, так и для передачи переменного тока.

При использовании на самолете в качестве основного вида источников электрической энергии трехфазных синхронных генераторов наибольший интерес представляют две системы передачи электрической энергии, в которых корпус самолета используется в качестве одного из проводов.

В первой системе передачи электрической энергии, которую следует назвать трехпроводной системой передачи электрической энергии переменного тока, в качестве нулевого провода используется корпус самолета



Фиг. 15.19. Принципиальная схема трехпроводной системы передачи электрической энергии трехфазного тока.

(фиг. 15.19). Достоинством такой трехпроводной системы передачи электрической энергии переменного тока является возможность включать потребители как на линейное, так и на фазовое напряжение генераторов. Как видно из фиг. 15.19, здесь потребители однофазного тока включаются так же, как и потребители постоянного тока при однопроводной системе.

Во второй системе передачи электрической энергии, которую следует назвать двухпроводной системой передачи электрической энергии переменного тока, нулевая точка генераторов не выводится вообще, а все однофазные потребители приключаются к линейным напряжениям, образуя соединение в треугольник, при этом в качестве одного из линейных проводов используется корпус самолета (фиг. 15.20). В такой двухпроводной системе передачи электрической энергии трехфазного тока напряжение между линейными проводами и напряжение между линейным проводом и корпусом самолета одно и то же и равно линейному напряжению.

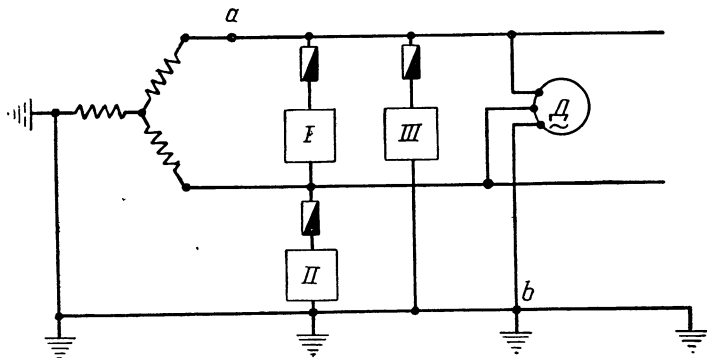
Преимуществом двухпроводной системы передачи перед трехпроводной является то, что здесь имеется два линейных провода вместо трех и при одном и том же линейном напряжении трехфазной системы это может привести к экономии веса сети.

К числу недостатков этой системы относятся следующие:

а) при одном и том же линейном напряжении трехфазной системы в двухпроводной системе передачи напряжения между корпусом и линейным проводом получается в $\sqrt{3}$ раз больше, чем в трехпроводной системе с нулевым заземленным проводом. Это вызывает повышение опасности поражения током при прикосновении к голым токонесущим частям;

б) при сохранении одного и того же напряжения между линейным проводом и корпусом самолета ток в линейном проводе получается в $\sqrt{3}$ раз больше, за счет чего экономия в весе сети получается незначительной;

в) при использовании корпуса самолета в качестве одного из линейных проводов трехфазной сети вследствие значительно меньшего его сопротивления создается асимметрия линейных напряжений у потребителей; эта асимметрия возрастает по мере удаления потребителя от источников тока;



Фиг. 15. 20. Принципиальная схема двухпроводной системы передачи электрической энергии трехфазного тока.

г) при обрыве одного из линейных проводов однофазные потребители, присоединенные одними зажимами к оборванному проводу, а другими — к корпусу самолета или к исправному линейному проводу, оказываются соединенными последовательно (см. фиг. 15. 20), что приводит к ненормальному и даже опасному режиму работы этих потребителей. Трехфазные потребители энергии при обрыве одного из линейных проводов получают однофазное питание, при этом одна фазовая цепь этих потребителей находится под полным напряжением, а две остальные фазовые цепи также оказываются включенными последовательно (см. фиг. 15. 20);

д) случайное ухудшение электрического соединения с корпусом самолета у трехфазных потребителей вызывает резкое искажение векторной системы напряжений на зажимах этих потребителей, что приводит к ненормальной работе этих потребителей.

Указанные недостатки двухпроводной системы передачи электрической энергии трехфазного переменного тока позволяют сделать вывод о том, что более предпочтительна для тяжелых самолетов трехпроводная система передачи переменного тока.

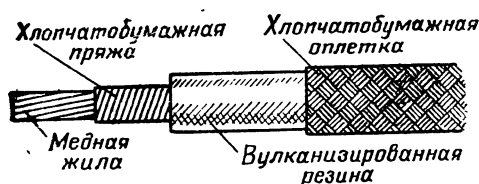
При проектировании такой трехпроводной системы передачи электроэнергии необходимо предусмотреть такое включение потребителей, при котором обеспечивается приблизительно равномерная нагрузка всех фаз генераторов электрической энергии.

Глава XVI

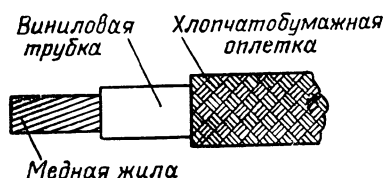
ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

§ 16.1. САМОЛЕТНЫЕ ПРОВОДА

Раньше, на первых этапах развития электрооборудования самолетов, для монтажа электрической сети самолета применялись те же провода, которые использовались для монтажа наземных низковольтных сетей. Однако по мере развития электрооборудования самолетов и в связи с повышением требований в отношении надежной и безотказной работы самолетной электрической сети появилась необходимость использовать для прокладки на самолете провода с повышенными электрическими и механическими свойствами. В настоящее время на самолетах применяются многожильные провода специальной конструкции. Токоведущие жилы самолетных проводов изготавливаются из большого числа луженых тонких проволок из чистой мягко отожженной меди. Это обеспечивает



Фиг. 16.1. Провод ЛПРГС с последовательно снятыми слоями изоляции.



Фиг. 16.2. Провод БПВЛ с последовательно снятыми слоями изоляции.

самолетным проводам гибкость и эластичность, что очень важно для предотвращения обрыва проводов при их изгибах. Самолетные провода бывают низковольтные и высоковольтные.

Применявшиеся ранее низковольтные провода имели марки: ЛПРГС, ЛПРГСЭ, СПВПЛ.

На проводах ЛПРГС (лакированный провод с резиновой изоляцией, гибкий, самолетный) изоляцией служил тонкий слой хлопчатобумажной пряжи, покрытый слоем вулканизированной резины. Провод имел внешнее покрытие из хлопчатобумажной оплетки с нанесенным тонким слоем специального лака. На фиг. 16.1 изображен провод ЛПРГС с последовательно снятыми слоями изоляции. Провод СПВПЛ (самолетный провод с виниловой изоляцией, покрытый пряжей и слоем лака) отличался от провода ЛПРГС тем, что у него вместо резины использовался виниловый пластикат.

В настоящее время на самолетах применяются провода марки БПВЛ и БПВЛЭ. Провод БПВЛ (бумажно-полистиролвиниловой изоляции)

значительно легче провода СПВПЛ, и его изоляция является более огнестойкой. На фиг. 16.2 изображен провод БПВЛ с последовательно снятыми слоями изоляции. Провода БПВЛЭ отличаются от проводов БПВЛ наличием на них экранирующей оплетки. В настоящее время провода марки ЛПРГС и СПВПЛ для монтажа самолетных и электрических сетей почти не применяются.

Высоковольтные провода, применяемые на самолетах, выпускаются двух марок: ПВЛ (провод высоковольтный лакированный) и ПВЛЭ (провод высоковольтный лакированный экранированный). В обеих марках высоковольтных проводов токопроводящая жила имеет одно сечение, равное $1,3 \text{ мм}^2$. В табл. 16.1 приведены основные технические данные проводов марки БПВЛ и БПВЛЭ.

Таблица 16.1

Технические данные проводов БПВЛ и БПВЛЭ

Номинальное сечение в мм^2	Омическое сопротивление 1 км провода в омах при $+20^\circ\text{C}$	Номинальный наружный диаметр в мм		Расчетный вес в кг/км	
		БПВЛ	БПВЛЭ	БПВЛ	БПВЛЭ
0,35	58,0	2,3	2,9	7,5	20,0
0,50	41,3	2,5	3,1	10,0	23,0
0,75	26,8	2,7	3,3	13,0	29,0
0,88	22,8	2,8	3,4	15,0	32,0
1,0	20,5	3,0	3,6	16,5	33,0
1,25	16,3	3,1	3,9	20,0	50,0
1,50	13,3	3,4	4,2	23,0	61,0
1,93	10,42	3,6	4,4	30,0	62,0
2,50	8,0	3,9	4,7	35,0	68,0
3,0	6,58	4,1	4,9	42,0	77,0
4,0	5,0	4,7	5,5	50,0	86,0
5,15	3,85	5,1	5,9	70,0	100,0
6,0	3,3	5,4	6,2	72,0	114,0
8,8	2,4	6,2	7,0	112,0	158,0
10,0	2,0	6,9	8,11	126,0	196,0
13,0	1,5	7,5	8,7	165,0	237,0
16,0	1,2	8,0	9,2	178,0	261,0
21,0	0,96	8,9	10,1	250,0	335,0
25,0	0,8	9,5	10,7	270,0	360,0
35,0	0,57	11,1	12,3	370,0	477,0
41,0	0,49	12,0	13,2	470,0	597,0
50,0	0,40	13,0	14,2	515,0	634,0
70,0	0,29	14,5	15,7	690,0	815,0
95,0	0,20	17,0	18,2	952,0	1150,0

Конструкция самолетных проводов отличается от конструкции обычных проводов, применяемых в наземных электротехнических устройствах, повышенными электрическими и механическими свойствами, а также устойчивостью к разрушающему действию керосина, бензина, масла и влаги.

В современных самолетных электрических сетях укладываются десятки тысяч метров проводов, состоящих из большого количества отрезков различной длины и различных сечений. Поэтому для удобства обслуживания электрической сети самолета все провода отдельных участков самолетной электрической сети имеют обозначения. Система обозначений выбирается в зависимости от сложности самолетной электрической сети, причем за основу берутся следующие требования.

1. Каждая самостоятельная электрическая цепь должна иметь буквенное обозначение по первым буквам или букве наименования потребителя или источника электроэнергии. Присвоенное цепи буквенное обозначение должно входить в обозначение проводников всех элементов электрооборудования, включенных в эту цепь.

2. Помимо буквенных знаков, каждый провод должен иметь свой индивидуальный номер в виде цифр, следующих за буквами. Цифры должны указывать порядковый номер участка цепи, в которую включен провод.

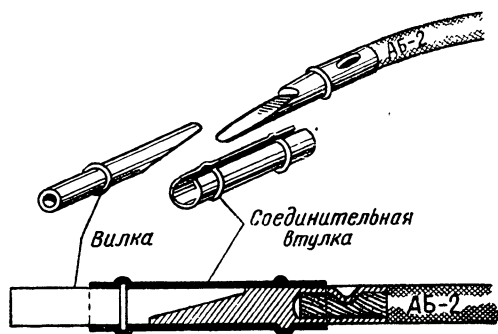
3. Обозначение нулевых и минусовых проводов должно быть дополнительно выделено знаком «ноль» (0), или «—» (минус), расположенным впереди буквенно-цифрового обозначения.

Обозначения наносятся на провод с помощью специальной нестирающейся краски на равных расстояниях (через 20—30 см) по всей длине провода. Кроме этого, провод обязательно обозначается у наконечников.

В некоторых случаях, помимо указанных обозначений проводов при монтаже электрической сети, используются провода разных цветов, например, провода БПВЛ окрашены в три цвета (белый, голубой и розовый), причем белые провода используются для монтажа электрооборудования, голубые — для монтажа радиооборудования, розовые — для монтажа агрегатов электрифицированного вооружения.

При обрыве провода в процессе эксплуатации электрической сети самолета необходимо заменить оборванный провод новым такого же или большего сечения, если отсутствует провод подходящего сечения.

В крайних случаях и в условиях боевых действий авиации допускается сращивание проводов либо с помощью горячей пайки, либо с помощью индивидуальных разъемов. При сращивании проводов горячей пайкой вместе с припоем применяется канифоль, но ни в коем случае нельзя применять кислоту. Для холодного сращивания проводов без пайки применяются специальные наконечники, называемые индивидуальными разъемами. Такой индивидуальный разъем состоит из трех частей (фиг. 16.3). Сращивание проводов с помощью индивидуальных разъемов производится следующим образом. Зачищенные концы сращиваемых проводов вставляют в вилки индивидуального разъема и обжимают с помощью специальных щипцов. После этого вилки заводят в пружинно-контрящиеся гнезда соединительной втулки и защелкивают, благодаря чему происходит надежное электрическое соединение вилок между собой. Затем на стык натягивают отрезок виниловой трубки и с обеих сторон соединения накладывают по бандажу из шпагата.



Фиг. 16.3. Индивидуальный разъем.

Такие индивидуальные разъемы наряду с хорошим контактом обеспечивают большую механическую прочность на разрыв места срачивания проводов.

Иногда индивидуальные разъемы используются в качестве разветвительных точек. В этом случае в гнездо вилки индивидуального разъема можно вводить с каждой стороны не более двух проводов. Оба провода зачищают, распускают и из них делают одну общую плотную скрутку, которую вводят в гнездо вилки, после чего вилку обжимают. Однако использование индивидуальных разъемов в качестве точек разветвления допустимо лишь в крайних случаях, при первой же возможности необходимо точку разветвления перенести на стационарное контактное соединение. Подобные индивидуальные разъемы изготавливаются трех типов в зависимости от сечения срачиваемых проводов.

Самолетные провода в процессе монтажа электрической сети приходится иногда разделять под наконечники. Заделка проводников в наконечники также производится горячей пайкой или с помощью холодного обжима в специальных пассатижах.

Для обжима наконечников к проводам сечением более $8,8 \text{ мм}^2$ применяются специальные обжимные станки; для обжима наконечников к проводам сечением менее $8,8 \text{ мм}^2$ применяются специальные обжимные пассатижи.

Ввиду ограниченного места и для удобства прокладки проводов по самолету провода электрической сети самолета группируются обычно в жгуты. При этом жгуты проводов, как правило, заготавливаются заранее, до монтажа проводов на самолете по специальным шаблонам. При монтаже электрической сети самолета применяют:

- 1) жгуты, обмотанные хлопчатобумажной (киперной) лентой;
- 2) жгуты, заключенные в хлорвиниловую оболочку;
- 3) жгуты, заключенные в алюминиевые или дюралюминовые трубы;
- 4) жгуты, заключенные в металлическую оплетку;
- 5) жгуты, заключенные в металлический желоб (короб);
- 6) жгуты, скрепленные тонкой и прочной бечевкой.

До Великой Отечественной войны на самолетах в основном использовались экранированные жгуты для устранения помех радиоприему. В последующем благодаря улучшению элементов электрооборудования и качества сетевых фильтров необходимость в сплошной экранировке самолетной электросети стала отпадать, и в настоящее время на самолете экранируются лишь такие провода и жгуты, которые могут являться источниками радиопомех (провода системы электрического зажигания, вибрационных регуляторов напряжения и т. п.) или которые идут к входным цепям усилителей с большими коэффициентами усиления (регуляторы, радиоустановки и т. д.).

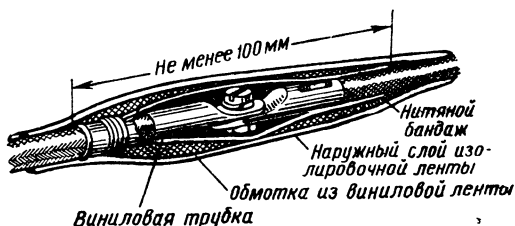
Провода в жгутах укладываются параллельно друг другу, скручивание проводов в жгуте не допускается. Если в жгуте проводов должен проходить один или несколько экранированных проводов, то они должны прокладываться по периферии жгута, чтобы было удобно металлизировать экран проводов. Провода большого сечения (питательная сеть) прокладываются не в жгутах, а отдельно. Часто соединение отдельных участков самолетной электрической сети осуществляется не одним проводом большого сечения, а берется несколько проводов меньшего сечения, соединенных параллельно. Этим достигается, во-первых, удобство прокладки проводов, так как один провод большого сечения значительно менее эластичен и гибок, чем несколько проводов меньшего сечения, соединенных параллельно и имеющих суммарное сечение, равное сечению этого провода; во-вторых, при этом повышается жизнеспособность элек-

трической сети, так как при повреждении одного из соединенных параллельно проводов цепь остается замкнутой через остальные параллельные провода, и, наконец, в-третьих, общий вес проводов при этом получается меньше, так как на провода меньших сечений допускаются большие плотности тока.

Жгуты, так же как и провода, имеют буквенно-цифровые или иногда только цифровые обозначения, которые наносятся краской на изоляционных покрытиях, бандажах или специальных бирках через каждые 1,5—2 м. Для прокладки жгутов и проводов по борту самолета применяются специальные хомуты.

§ 16.2. МОНТАЖНОЕ И УСТАНОВОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

В монтажно-установочное оборудование входят сетевые разъемы, распределительные щитки, коробки, панели и пульты. Самолетная электрическая сеть, как указывалось выше, характеризуется большим числом всевозможных разъемов и по существу состоит из ряда участков, объединенных друг с другом сетевыми разъемами. Сетевые разъемы устанавливаются в местах конструктивных разъемов самолета, на стенках герметических кабин, у съемных элементов электрооборудования и на распределительных щитках, коробках и панелях. По конструктивному выполнению сетевые разъемы на современных самолетах подразделяются на пять типов: 1) силовые вводы; 2) болтовые соединения; 3) зажимные (клеммные) колодки; 4) штепсельные разъемы; 5) индивидуальные разъемы.



Фиг. 16.4. Болтовое соединение проводов.

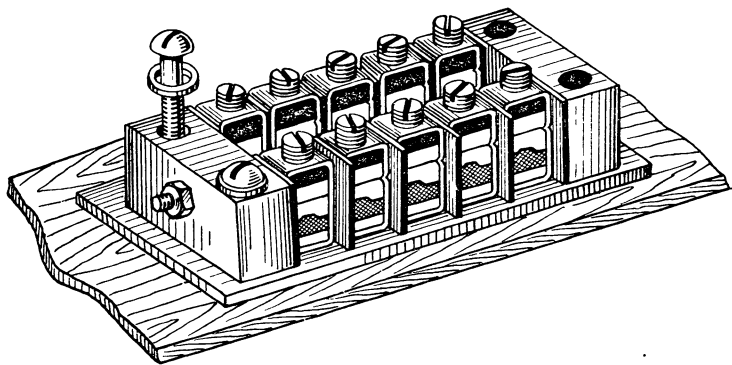
Силовые вводы. Силовые вводы предназначаются для прохода через герметизированные переборки отдельных проводов сечением 30 мм² и больше и представляют собой текстолитовую плиту, имеющую сквозную медную шпильку соответствующего диаметра. Крепление проводов по обеим сторонам шпильки осуществляется с помощью наконечников и гаек. При этом применяются специальные меры для герметизации места прохода шпильки через герметизированную переборку.

Болтовые соединения. Соединения этого типа используются обычно на мощных потребителях, не имеющих штепсельных разъемов, и для отрезков проводов термопар (в связи с трудностями пайки проводов из специальных сплавов). Опыт показывает, что применение штепсельных разъемов для крупных потребителей с токами до 800 а не оправдывает себя. В этих случаях провод, подведенный от самолетной сети, складывается своим наконечником с наконечником от провода машины или агрегата; наконечники соединяются болтом требуемого сечения. На полученный стык надевается виниловая трубка и накладываются бандажи из шпагата (фиг. 16.4). Место стыка обматывается внахлестку виниловой лентой и сверху изолируется лентой повышенного качества. Соединения подобного рода закрепляются обязательно на весу, чтобы стык не касался корпуса агрегата. В противном случае место стыка изнашивается от вибрации.

Зажимные (клеммные) колодки и блоки переходных контактов. Блоки переходных контактов служат для соединения под гайку или болт проводов электрической сети самолета. Они выполняются на текстолитовых колодках и монтируются на распределительных щитах.

тельных коробках и щитках. На фиг. 16.5 изображен один из таких блоков переходных контактов, применяемых на самолетах. Для крепления проводов электрической сети самолета к блоку переходных контактов концы проводов обычно разделяются под наконечники или зачищаются и облуживаются, например, для блока переходных контактов, изображенного на фиг. 16.5.

Зажимные, или клеммные, колодки выполняются на текстолитовом основании и соединяют провода электрической сети самолета под гайку или винт. Они монтируются на дуралюминовых панелях, на перегородках кабин или непосредственно на конструкции самолета. На фиг. 16.6 изображена одна из таких колодок. Концы проводов, заходящие в такую колодку, разделяются под наконечники.



Фиг. 16.5. Блок переходных контактов.

Для надежного соединения наконечников применяются шайбы пружинящие и простые плоские; при этом наконечники проводов должны помещаться между двумя плоскими шайбами.

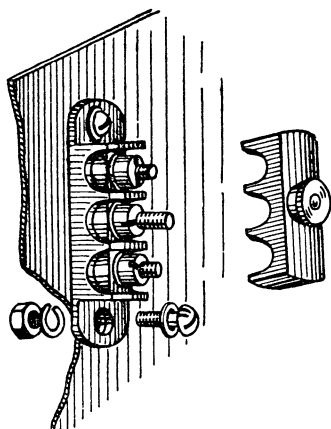
На одном зажиме допускается соединение до четырех проводов. Проворачивание болтов при затяжке предотвращается тем, что их головки имеют две снятых лыски. Завертывание гаек разрешается только с помощью торцевых ключей.

Штепсельные разъемы. Наиболее распространенными разъемами на самолете являются штепсельные. Существует очень много типов штепсельных разъемов, предназначенных для соединения проводов от одного, двух и до многих десятков. На фиг. 16.7—16.9 изображены образцы штепсельных разъемов, применяемых на самолетах. На фиг. 16.7 изображен штепсельный разъем, который монтируется на задних панелях распределительных щитов и металлических перегородках.

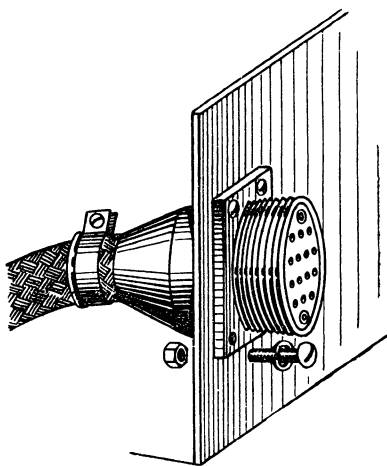
На фиг. 16.8 изображен малогабаритный штепсельный разъем, получивший широкое распространение для соединения отдельных элементов электрооборудования с электрической сетью самолета. При монтаже малогабаритных разъемов необходимо предварительно соединить провода со штырями и гнездами разъемов. Для этого штепсельные разъемы необходимо разобрать и припаять провода. На фиг. 16.8 штепсельный разъем изображен также и в разобранном виде, откуда нетрудно уяснить порядок его сборки.

Ко всем штепсельным разъемам провода независимо от их сечения припаиваются. После того как штепсельный разъем собран, все виниловые трубки, надетые предварительно на провода, сгоняются по проводам так, чтобы их торцы дошли до пластмассового основания штепсельного разъема, и на провода накладывается бандаж из ниток (фиг. 16.9).

Все новые штепсельные разъемы, предназначенные к установке в сети самолета, имеют штуцер для выхода проводов, в который можно ввести экранированный шланг. В случае выхода неэкранированного жгута в штуцер штепсельного разъема для закрепления его на проводах

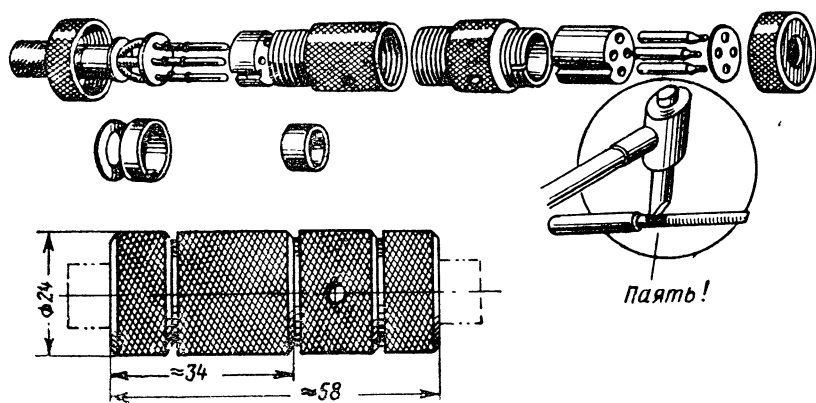


Фиг. 16.6. Зажимная колодка.



Фиг. 16.7. Штепсельный разъем.

вставляются куски плотного войлока-фильца (фиг. 16.10). Необходимо следить, чтобы войлок плотно зажимал провода, предохраняя их от обрыва в месте пайки при вытаскивании вилки из розетки. Если в жгуте имеются экранированные провода, их оплетка подрезается, провод вы-

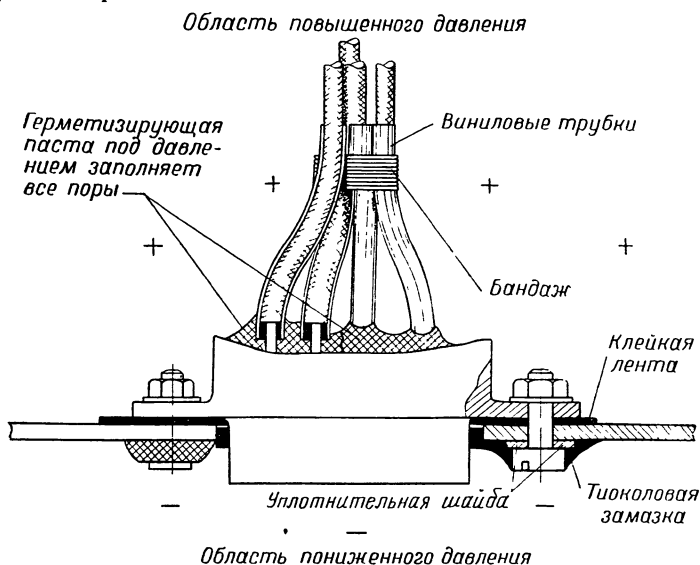


Фиг. 16.8. Малогабаритный штепсельный разъем.

водится наружу, а на оплетку надевается наконечник. Наконечник соединяется с корпусом штепсельного разъема под болт, крепящий съемную половину штуцера с основной (фиг. 16.10).

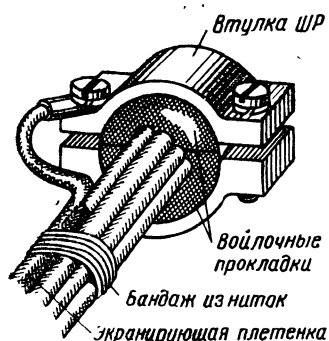
Чтобы избежать просачивания воздуха, на всех днищах герметических кабин фланцы штепсельных разъемов устанавливаются на клейкой герметизирующей ленте и тиоколовой замазке. Для этой цели внутренняя часть разъема (см. фиг. 16.9) заливается подогретой до 50—60°С мастикой из 70% чистого натурального воска и 30% парафина. Чтобы пластичная мастика под давлением заполняла все поры, залитые мастикой основания штепсельных разъемов должны устанавливаться со стороны объема с повышенным давлением. При установке основания со сто-

роны разгерметизированных отсеков воздух из области повышенного давления будет стремиться просочиться вдоль проводов; такой штепсельный разъем будет «стравливать» давление.



Фиг. 16.9. Герметический штепсельный разъем.

Необходимо иметь в виду, что в штепсельных разъемах, как правило, провода, находящиеся со стороны сети, находящейся под напряжением, заводятся не в вилки, а в гнезда разъема для предотвращения случайных коротких замыканий.



Фиг. 16.10. Присоединение проводов к штепсельному разъему.

Для больших токов, например, для включения аэродромного питания к бортовой сети самолета, применяются специальные штепсельные разъемы, в которых обеспечивается включение тока лишь после того, как образуется надежный контакт между штырьками и гнездами разъема. При подключении такого разъема благодаря специальной форме штырьков сначала происходит соединение между основными силовыми контактами и затем уже образуется контакт во вспомогательной цепи, в результате чего срабатывает контактор, включающий силовую цепь. При разъединении процесс происходит в обратном порядке: сначала разрывается вспомогательная цепь, вследствие чего контактор разрывает силовую цепь, и затем уже разъединяются силовые контакты штепсельного разъема. Электрическая схема такого штепсельного разъема изображена на фиг. 16.11.

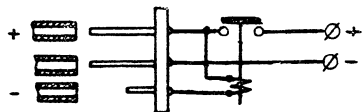
Благодаря этому силовые контакты штепсельного разъема предохраняются от подгорания и разрушения.

Индивидуальные разъемы. Индивидуальные разъемы, как указывалось выше, служат для соединения отдельных проводов электрической сети самолета.

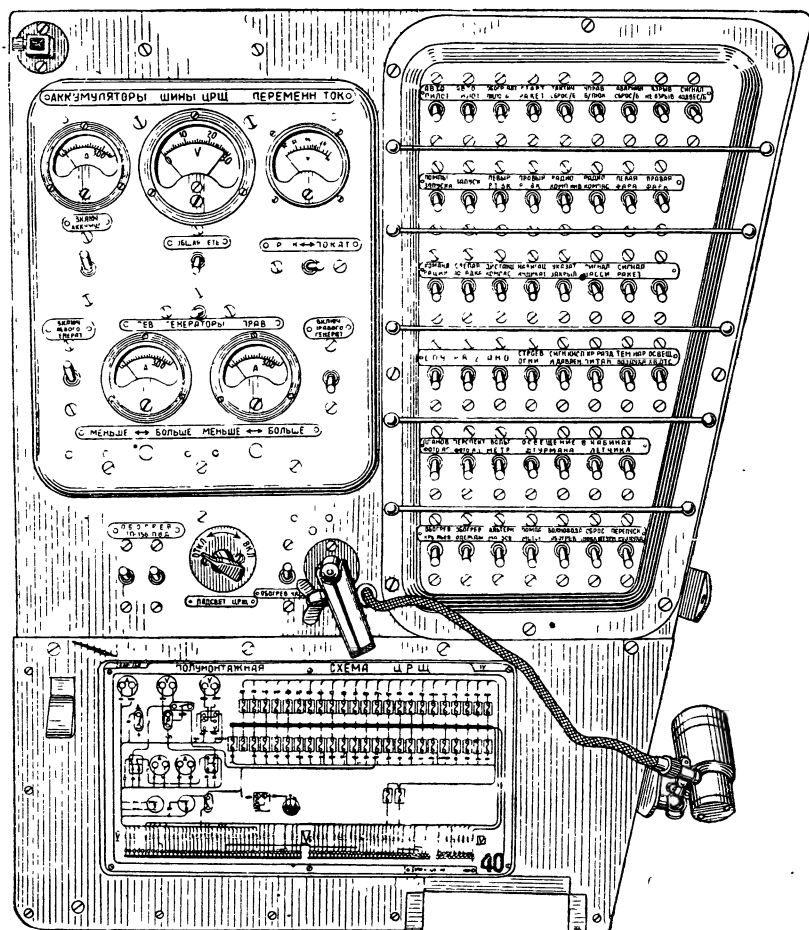
Устройство индивидуального разъема показано на фиг. 16.3. К качеству соединения проводов с помощью индивидуальных разъемов предъявляются жесткие механические и электрические требования. Индивидуальные разъемы должны выдерживать следующие механические

усилия на разрыв: провода сечением до $0,35 \text{ мм}^2$ —2 кг, до 3 мм^2 —5 кг, до $5,15 \text{ мм}^2$ —6 кг и до 70 мм^2 —20 кг. Величина переходного сопротивления при этом не должна превышать 100 мком.

Распределительные щитки, коробки и панели служат для монтажа на них силовых проводов, коммутационной и защитной аппаратуры, сетевых разъемов и приборов контроля режима работы отдельных агрегатов и источников электрической энергии самолета. Чем сложнее электрическая сеть самолета, тем больше она насыщена распределительными щитками, коробками и пультами. Электрические распределительные щитки, коробки и панели размещаются в наиболее доступных, хорошо видимых и удобных с эксплуатационной точки зрения местах самолета. На распределительных щитках и панелях располагаются обычно коммутационная аппаратура, выполняющая функции управления режимом работы отдельных агрегатов самолета, и контрольно-измерительная аппаратура. Поэтому щитки и панели находятся непосредственно около рабочего места тех членов экипажа, в обязанность которых входит управление и контроль за работой соответствующих агрегатов. На передней панели щитков и пультов помещаются



Фиг. 16.11. Схема штепсельного разъема для включения аэродромного питания.

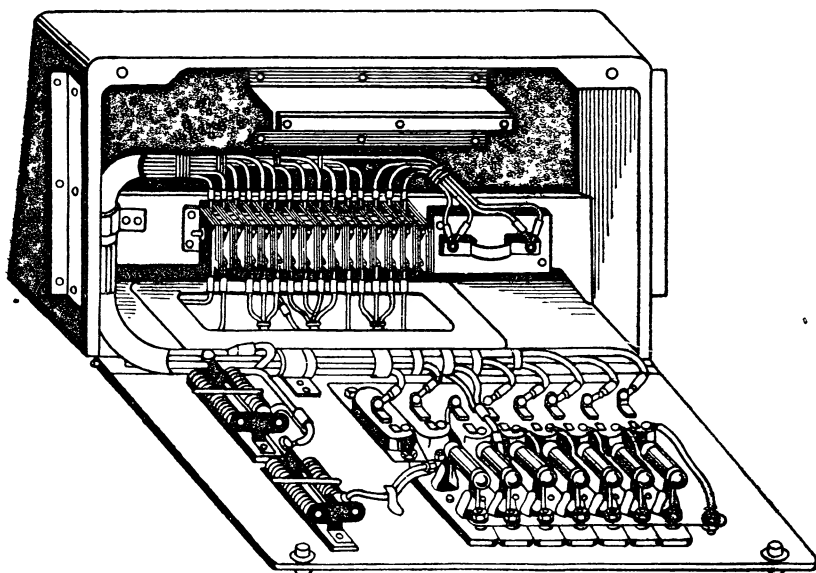


Фиг. 16.12. Передняя панель самолетного распределительного щитка.

обычно все рукоятки управления коммутационной аппаратуры и контрольно-измерительные приборы. На задних и боковых стенках таких щитков и панелей располагаются защитная аппаратура, сетевые разъемы и монтажные провода.

В качестве примера на фиг. 16.12 изображена передняя панель одного из распределительных щитков реактивного бомбардировщика.

В распределительных коробках монтируются сетевые разъемы, силовая коммутационная аппаратура (реле и контакторы) и защитная аппаратура. Коммутационная аппаратура, служащая для непосредственного управления режимом работы агрегатов самолета и элементов электрооборудования (выключатели, переключатели, рубильники), разме-



Фиг. 16.13. Самолетная распределительная коробка.

щается на распределительных коробках крайне редко. Поэтому распределительные коробки располагаются, как правило, не у рабочих мест членов экипажа, а по всему самолету в непосредственной близости от соответствующих потребителей с учетом, однако, свободного доступа к ним. На фиг. 16.13 изображена одна из распределительных коробок, применяемых на самолетах.

§ 16.3. КОММУТАЦИОННАЯ И ЗАЩИТНАЯ АППАРАТУРА

В систему передачи и распределения электрической энергии на самолете входит очень большое количество самой разнообразной коммутационной и защитной аппаратуры. К коммутационной аппаратуре относятся все электрические устройства и аппараты, посредством которых осуществляется включение, выключение и переключение электрических цепей (выключатели, переключатели, рубильники, контакторы, концевые выключатели и т. д.).

К защитной аппаратуре относятся все те электрические устройства, с помощью которых осуществляется отключение элементов электрооборудования самолета и отдельных участков электрической сети от общей питательной электрической сети самолета в случае коротких замыканий и перегрузок в этих элементах или сигнализации о ненормальной работе генераторов или потребителей электрической энергии. К защитной

аппаратуре на самолете принадлежат тепловые автоматы и плавкие предохранители, а в некоторых случаях — специальные реле.

По назначению самолетная коммутационная аппаратура может быть разбита на три группы.

Первая группа коммутационной аппаратуры служит для непосредственного включения, выключения или переключения электрических цепей. К этой коммутационной аппаратуре относятся различные выключатели, переключатели, рубильники, тумблеры, кнопки. Аппаратура приводится в действие непосредственно тем или иным членом экипажа самолета и размещается, как правило, в непосредственной близости от членов экипажа на соответствующих распределительных щитах и панелях.

Кнопка является простейшим коммутационным устройством, служащим для кратковременного замыкания или размыкания электрической цепи. Управление кнопками производится вручную. Выполняют кнопки так, чтобы после прекращения нажатия на головку кнопки, с которой связаны подвижные контакты, эта головка возвращалась в исходное положение под действием специальной возвратной пружины.

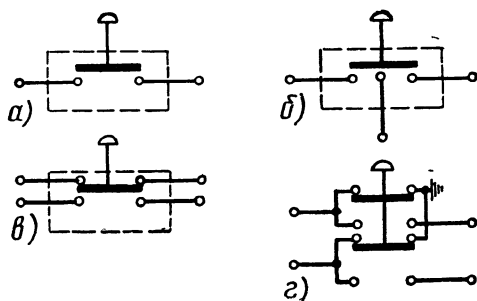
На фиг. 16.14 приведены электрические схемы кнопок, применяемых на самолетах. Необходимая величина контактного давления после замыкания электрической цепи кнопок обеспечивается

обычно пружинящими свойствами неподвижных или подвижных контактов. Как правило, кнопки применяются для замыкания и размыкания небольших токов (цепей сигнализации, цепей управления электромагнитных устройств, реле, контакторов и т. п.). Кнопки рассчитываются на непродолжительное включение, не более одной минуты.

Выключатели и переключатели служат для замыкания или размыкания электрических цепей, однако в отличие от кнопок они рассчитываются, как правило, не на кратковременное, а на длительное действие и на несколько большие токи.

Самолетные выключатели и переключатели бывают трех типов: выключатели и переключатели перекидного, нажимного и поворотного действия. Нажимной выключатель или переключатель после прекращения нажатия возвращается в исходное положение с помощью пружины и обеспечивает замыкание электрической цепи только при нажатии на рукоятку. Перекидной выключатель или переключатель имеет два положения и после перестановки его в одно из них остается в этом положении до тех пор, пока не будет перекинут в исходное положение. Выключатели или переключатели поворотного действия производят включение или переключение электрической цепи при повороте их рукоятки управления на определенный угол. Конструкция переключателей поворотного типа позволяет осуществить большое число различных фиксированных положений переключателя, т. е. различных переключений.

Выключатели и переключатели ручного пользования могут быть предназначены для управления как одной, так и одновременно несколькими электрическими цепями. Электрические схемы самолетных выключателей и переключателей приведены на фиг. 16.15.



Фиг. 16.14. Электрические схемы кнопок, применяемых на самолете.

Монтируются выключатели и переключатели на панелях из металла или изоляционного материала, причем контактное устройство располагается позади панели.

Присоединение токонесущих проводников к контактным частям выключателей и переключателей осуществляется зажимными винтами с пружинящими шайбами или гайками. Так как при неисправности или поломке выключателя замыкания на корпус вероятнее всего ожидать со стороны подвижного контакта, рекомендуется присоединение минусового провода выполнять со стороны подвижного контакта. Это позволяет в ряде случаев избежать короткого замыкания.

Выключатели ручного управления изготавливаются на силу тока до 100 а. При больших токах обычно прибегают к дистанционному включению с помощью контакторов.



Фиг. 16.15. Электрические схемы выключателей и переключателей.

Вторая группа коммутационной аппаратуры служит для дистанционного включения, выключения или переключения электрических цепей. К этой группе относятся всевозможные реле и контакторы, представляющие собой электромагнитные устройства, с якорем которых связаны контакты, замыкающие или размыкающие те или иные цепи при перемещении якоря.

Аппаратура приводится в действие размыканием или замыканием цепи обмотки электромагнитного устройства с помощью коммутационной аппаратуры первой группы или защитной аппаратуры. Поэтому эта аппаратура может быть установлена на значительном расстоянии от рабочих мест членов экипажа так, как это удобно по соображениям монтажа тех цепей, управлять работой которых она предназначена.

Конструктивно реле и контакторы выполняются таким образом, что якорь электромагнита несет на себе подвижную контактную систему. Работа, совершаемая якорем электромагнита реле или контактора, идет в основном на перемещение якоря с подвижной контактной системой, на сжатие (или растяжение) противодействующих пружин и на создание контактного давления.

В целях обеспечения надежного контакта в условиях возможных вибраций и эволюций самолета сила, действующая на якорь электромагнита в конце хода (при минимальном зазоре), должна быть больше силы возвратной пружины на величину возможных динамических сил при десятикратном земном ускорении, т. е.

$$F_s \geq F_{\delta \min} + 10mg,$$

где $F_{\delta \min}$ — сила противодействующих пружин, стремящихся разомкнуть контакты;

m — масса подвижных частей реле или контактора;

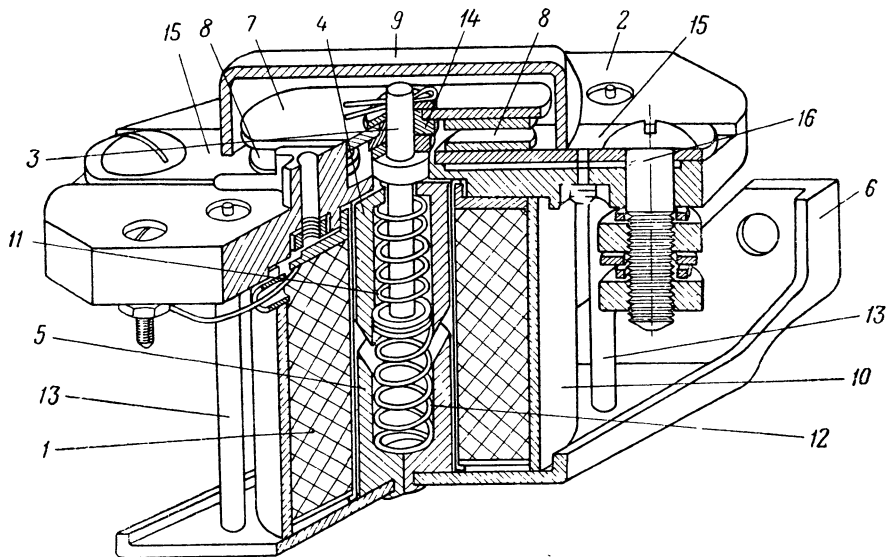
g — земное ускорение.

Самолетные электромагнитные реле в подавляющем большинстве случаев выполняются с электромагнитами клапанного или броневого типа. Эти реле предназначены для коммутации сравнительно небольших токов, до 25 а, причем число коммутируемых одновременно одним реле электрических цепей может достигать до десяти и более.

Выключатели, переключатели и реле предназначены для коммутации сравнительно небольших токов. Однако на самолетах имеются потреби-

тели электрической энергии весьма значительной мощности, номинальные токи которых могут достигать нескольких сотен ампер. Операции включения и выключения таких потребителей осуществляются дистанционно с помощью специальных электромагнитных выключателей, называемых контакторами.

На фиг. 16.16 приведен общий вид самолетного контактора. Контакт выполнен с электромагнитом броневых типа со стопом в виде усеченного конуса. Якорь электромагнита 4 имеет специальную выточку, в которой расположены буферная пружина 11 и ось 3, несущая подвижные контакты 7. При протекании через катушку 1 тока возникает магнитный поток, замыкающийся через сердечник электромагнита 5



Фиг. 16.16. Общий вид самолетного контактора.

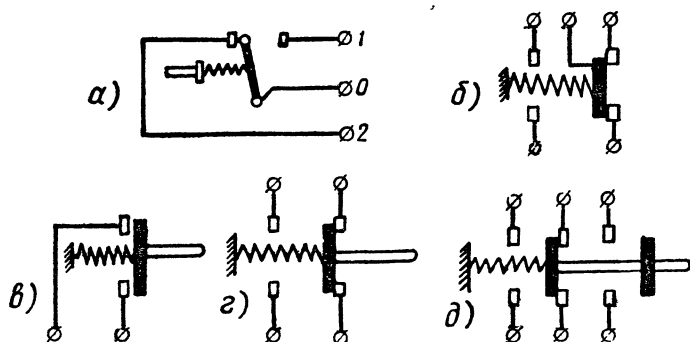
1—катушка, 2—каркас, 3—ось подвижных контактов, 4—якорь, 5—сердечник, 6—основание с креплением, 7—контакт подвижный, 8—контакт неподвижный, 9—крышка, 10—кожух, 11—буферная пружина, 12—возвратная пружина, 13—стяжные болты, 14—эбонитовая втулка, 15—шины, 16—винт крепления шины

и якорь 4. Якорь втягивается, увлекая ось 3 и подвижные контакты вниз и деформируя возвратную пружину 12. После соприкосновения подвижных контактов 7 с неподвижными контактами 8 дальнейшее перемещение якоря 4 и оси 3 будет деформировать буферную пружину 11, которая обеспечивает надежное нажатие контактов. После прекращения тока через катушку контактора возвратная пружина 12 возвращает якорь в исходное положение. Здесь для облегчения гашения дуги применен двойной разрыв тока контактами. Контакты таких контакторов выполняются из специального металлокерамического сплава, вследствие чего контакты подгорают незначительно и их переходное сопротивление невелико. Благодаря этому контакты этих контакторов не нуждаются в зачистке и восстановлении в процессе эксплуатации.

Наконец, к третьей группе коммутационной аппаратуры относятся всевозможные концевые и программные выключатели и переключатели. Обычно эта коммутационная аппаратура является необходимым элементом схемы того или иного электрифицированного агрегата и действует в зависимости от его режима работы. Например, когда тот или иной силовой электрифицированный механизм приходит в одно из крайних положений и дальнейшее его перемещение необходимо прекратить, соот-

ветствующие концевые выключатели должны разорвать цепь электрического двигателя этого механизма, с одной стороны, и обеспечить возможность его включения на обратное движение — с другой.

На фиг. 16.17 изображены наиболее распространенные электрические схемы самолетных концевых выключателей. В качестве примера на



Фиг. 16.17. Электрические схемы концевых выключателей.

фиг. 16.18 изображен разрез одного из самолетных концевых выключателей. Особенностью этого концевых выключателя является то, что он обеспечивает четкое переключение своих контактов при весьма небольших перемещениях его подвижных частей. Такие концевые выключатели получили название микровыключателей. Как видно из фигуры, подвижный контакт микровыключателя

укреплен на металлической плоской пружине 2. При штамповке этой пружины ей придан некоторый изгиб как в продольном, так и в поперечном направлениях. Благодаря этому достаточно незначительного перемещения штока 1 вниз, для того чтобы эта пружина резко изогнулась выпуклостью вниз, перекинув подвижный контакт в верхнее положение.

В качестве защитной аппаратуры наиболее широкое применение на самолетах получили плавкие предохранители и тепловые автоматы защиты.

Фиг. 16.18. Разрез микровыключателя.

На самолетах применяются следующие плавкие предохранители:

1) предохранители серии ПВ, которые изготавливаются на силы тока 2, 6, 10, 20, 30 и 40 а в закрытом исполнении и на 60, 80 и 100 а — в открытом. Плавкие вставки предохранителей серии ПВ изготавливаются из калиброванных серебряных проволок разного диаметра;

2) плавкие предохранители серии СП, которые изготавливаются на силу тока от 1 до 40 а; плавкие вставки предохранителей СП выполняются из цинка;

3) инерционные предохранители серии ИП, рассчитанные на силу тока от 5 до 150 а и более. Благодаря специальной конструкции плавкой вставки эти предохранители обладают значительной тепловой инерцион-

ностью действия, что позволяет использовать эти предохранители для защиты потребителей с большими кратностями пусковых токов;

4) тугоплавкие предохранители серии ТП, рассчитанные на силы тока в 200, 400 *a* и более. Плавкая вставка этих предохранителей выполняется из меди.

Имея простую конструкцию и небольшие вес и габариты, плавкие предохранители обладают в то же время и рядом весьма существенных эксплуатационных недостатков, к которым в первую очередь относятся:

1) отсутствие визуального контроля за состоянием предохранителя. В полете очень трудно обнаружить перегоревший предохранитель;

2) трудность, а подчас и невозможность замены предохранителей на самолете во время полета;

3) невозможность проверки характеристик предохранителя в процессе эксплуатации;

4) непостоянство характеристик предохранителей в процессе длительной эксплуатации;

5) необходимость наличия на борту самолета комплекта запасных предохранителей.

Указанные недостатки являются причиной того, что на современных самолетах имеется тенденция заменить в распределительных сетях плавкие предохранители тепловыми автоматами защиты.

По типу кинематической схемы механизма автоматы защиты делятся на два класса:

1) автоматы защиты без свободного расцепления органа управления и контактной системы;

2) автоматы защиты со свободным расцеплением органа управления и контактной системы.

Автоматы защиты без свободного расцепления позволяют принудительно удерживать защищаемую цепь во включенном состоянии путем нажатия на орган ручного управления независимо от величины тока, протекающего через автомат. В ряде случаев (при воздушном бое, аварийных режимах полета и т. п.) может оказаться необходимым обеспечить принудительное включение цепи, выключенной после срабатывания автомата, несмотря на наличие в цепи перегрузки, чтобы заставить работать жизненно важный для самолета электрифицированный агрегат (вооружение, шасси, радиосвязь, сигнализацию и т. п.). Но при этом необходимо иметь в виду, что во время принудительного удержания автомата во включенном состоянии цепь нагрузки оказывается незащищенной, и если в цепи имеется короткое замыкание, может произойти повреждение автомата и воспламенение изоляции цепи. Поэтому автоматы без свободного расцепления можно устанавливать только в таких цепях, которые не проходят в пожароопасных частях самолета.

Автоматы защиты со свободным расцеплением отключают при перегрузках и коротких замыканиях защищаемую цепь независимо от положения органа управления. Эти автоматы нельзя принудительно удерживать во включенном состоянии при наличии перегрузки в цепи, так как механизм свободного расцепления не позволяет замкнуть контакты до тех пор, пока чувствительный биметаллический элемент не остынет до определенной температуры.

Конструкция электрокинематического механизма автоматов со свободным расцеплением обычно сложнее, чем конструкция автоматов без свободного расцепления.

Самолетные биметаллические автоматы защиты выполняются на токи от 5 до 150 *a*. На самолетах широкое распространение получили тепловые автоматы как со свободным, так и без свободного расцепления.

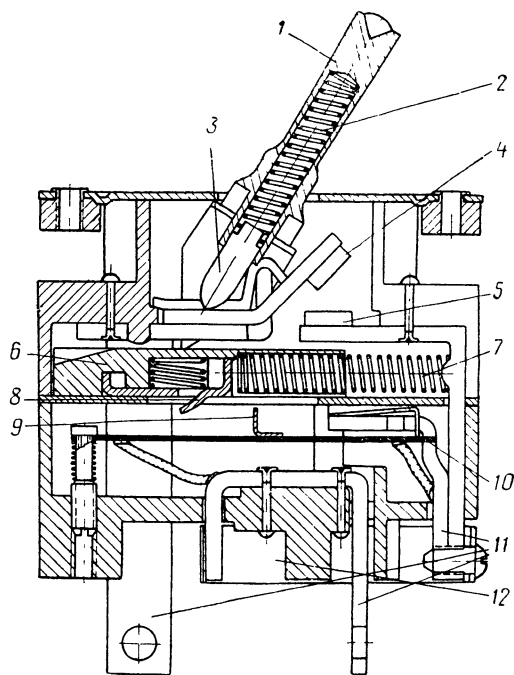
В качестве примера устройства самолетного биметаллического автомата защиты на фиг. 16. 19 схематически приведена конструкция одного из автоматов без свободного расцепления.

Автомат включается с помощью поворота рычажной рукоятки 1 влево. При этом пружина 2 сжимается и поршень рукоятки 3, передавая усилие сжатой пружины 2 на подвижный верхний контакт 4, заставляет его замкнуться с нижним неподвижным контактом 5.

Одновременно с этим каретка 6 нижним концом рычажной рукоятки 1 перемещается вправо, сжимая возвратную пружину 7. При крайнем

левом положении рычажной рукоятки 1 защелка 8 попадает на зуб 9, приваренный к биметаллической пластинке 10. Благодаря защелке 8 контакты автомата удерживаются в замкнутом положении. Часть рабочего тока, протекающего через шинки 11, контакты 4 и 5 и шунт 12, проходит через биметаллическую пластинку 10.

Если рабочий ток превышает допустимое значение, то биметаллическая пластинка 10 вследствие подогрева большим током прогибается вниз, освобождая защелку 8. При освобождении защелки 8 возвратная пружина 7 быстро перемещает каретку 6 влево, переводя рычажную рукоятку 1 в крайнее правое положение и осуществляя, таким образом, энергичное размыкание контактов 4 и 5. Нетрудно убедиться, что в данном случае возможно принудительное удержание контактов



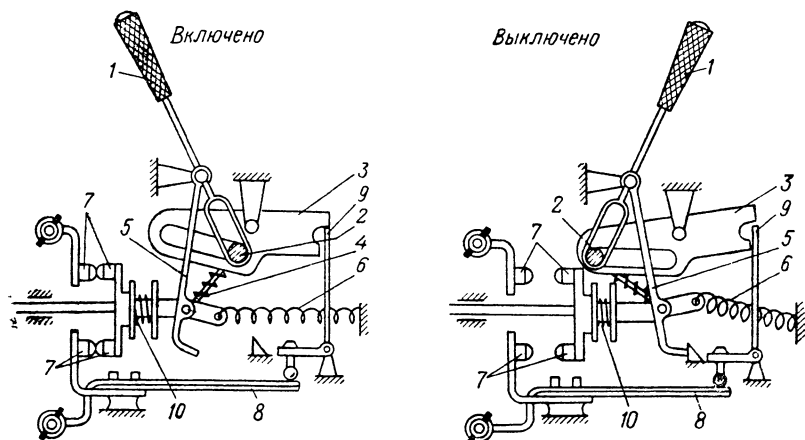
Фиг. 16. 19. Биметаллический автомат защиты без свободного расцепления.

4 и 5 в замкнутом состоянии, несмотря на то что биметаллическая пластинка 10 прогнута вниз вследствие протекания по ней большого тока перегрузки.

В качестве примера самолетного автомата защиты со свободным расцеплением на фиг. 16. 20 приведена кинематическая схема одного из таких автоматов. Автомат включается с помощью рычага 1, который для этого необходимо повернуть в крайнее левое положение. При этом подвижная ось 2, перемещаясь в вырезе рычага 3, переведет ось вспомогательной пружины 4 в крайнее правое положение. В это же время пружина 4 сначала сожмется, затем, выпрямляясь, резко перебросит рычаг 5 в крайнее левое положение, а связанные с ним подвижные контакты замкнут цепь. Если повернуть рычаг 1 вправо, то под действием вспомогательной пружины 4 и возвратной пружины 6, работающей на растяжение, рычаг 5 резко переместится вправо и подвижные контакты 7 разомкнут цепь. В случае недопустимо большого тока нагрузки, протекающего через биметаллическую пластинку 8, последняя прогнется и повернет рычаг 9 по направлению часовой стрелки. Рычаг 3 выйдет из зацепления и под действием пружин 4 и 6 повернется вокруг своей неподвижной оси по направлению часовой стрелки. Одновременно рычаг 5

стойдет вправо и контакты 7, кинематически связанные с ним, разомкнутся. Следует подчеркнуть, что пока биметаллическая пластинка не возвратится в первоначальное положение, а следовательно, рычаг 9 не войдет в зацепление с рычагом 3, включить автомат, т. е. замкнуть его контакты, нельзя. В самом деле, если перемещать рычаг 1 влево, то пружина 4 не будет деформироваться и оказывать давление на рычаг 5, т. е. рычаг 3 при этом будет поворачиваться вокруг своей неподвижной оси по направлению часовой стрелки. В результате этого рычаг 5 влево не переместится и контакты автомата не замкнутся.

Монтаж коммутационной и защитной аппаратуры осуществляется, как правило, на электрических щитках, коробках, и панелях, а в некоторых случаях непосредственно у потребителей или источников электро-



Фиг. 16.20. Биметаллический автомат защиты со свободным расцеплением

1—рычаг, 2—подвижная ось, 3—рычаг, 4—вспомогательная пружина, 5—рычаг, 6—возвратная пружина, 7—подвижные контакты, 8—биметаллическая пластинка, 9—рычаг, 10—демпферная пружина.

энергии. При монтаже коммутационной аппаратуры особенно большое внимание уделяется жесткости крепления этой аппаратуры и надежной изоляции токоведущих частей от корпуса.

Рубильники, выключатели, переключатели, кнопки и прочая коммутационная аппаратура, служащая для управления, монтируются на передних панелях щитков и пультов, причем положение рукояток выключающих устройств должно быть при выключенном положении вниз или влево, а при включенном положении — вверх или вправо. Для управления рядом ответственных агрегатов электрооборудования у выключателей и переключателей предусматривается фиксация их в выключенном или включенном положениях. Это делается для того, чтобы предотвратить случайные переключения, могущие привести к выходу из строя агрегата или к аварии его.

Реле и контакторы располагаются на задних сторонах панелей распределительных щитков и пультов управления или внутри распределительных коробок. При их монтаже следует обращать внимание на правильное пространственное положение этой аппаратуры, если таковое предусматривается заводом.

Концевые выключатели монтируются на приводе того механизма, ограничивать перемещение которого они предназначены, или непосредственно на самом механизме. Особенно жесткие требования при монтаже концевых выключателей предъявляются к правильному регулированию их и жесткому креплению. При неправильном регулировании концевых

выключателей они могут либо останавливать механизм, когда он еще не пришел в свое крайнее положение, либо не отключать его в крайнем положении. В обоих случаях это может привести к очень серьезным последствиям вплоть до аварии, выхода из строя механизма или разрушения всего самолета. Такие же последствия могут получиться и в результате недостаточно жесткого крепления конечных выключателей, так как при этом они могут переместиться, что приведет к их расстройке.

Защитная аппаратура, к которой в основном относятся плавкие предохранители и тепловые автоматы защиты, монтируется на задних и боковых стенках распределительных щитков и пультов и в распределительных коробках. В некоторых случаях биметаллические автоматы защиты, которые одновременно с функциями защиты могут выполнять и функции коммутационной управляющей аппаратуры, монтируются на передних панелях распределительных щитков и пультов.

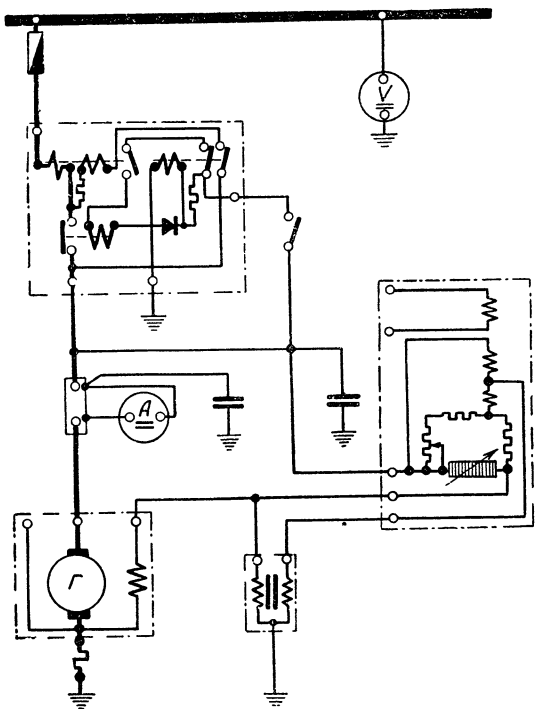
Плавкие предохранители обычно монтируются в блоках защиты, которые расположены на панелях или специальных кронштейнах.

§ 16.4. ИЗОБРАЖЕНИЕ СХЕМ САМОЛЕТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

При изображении самолетных электрических сетей в зависимости от назначения схемы различают принципиальные, полумонтажные, фидерные и монтажные схемы.

П р и н ц и п и а л ь н ы е с х е м ы. Назначение принципиальных схем заключается в таком изображении электрической связи между электрифицированными установками самолета, при котором наиболее просто можно уяснить принцип действия установок и их коммутационной и защитной аппаратуры. На принципиальных схемах все эти элементы электрической сети и электрифицированные установки изображаются условно и электрические соединения между ними показываются с помощью прямых линий, пересекающихся под прямым углом.

На принципиальных схемах, как правило, показываются только основные элементы электрической сети. Второстепенные элементы, которые для пояснения принципа действия существенного значения не имеют (монтажно-установочное оборудование, часть распределительных коробок, щитков



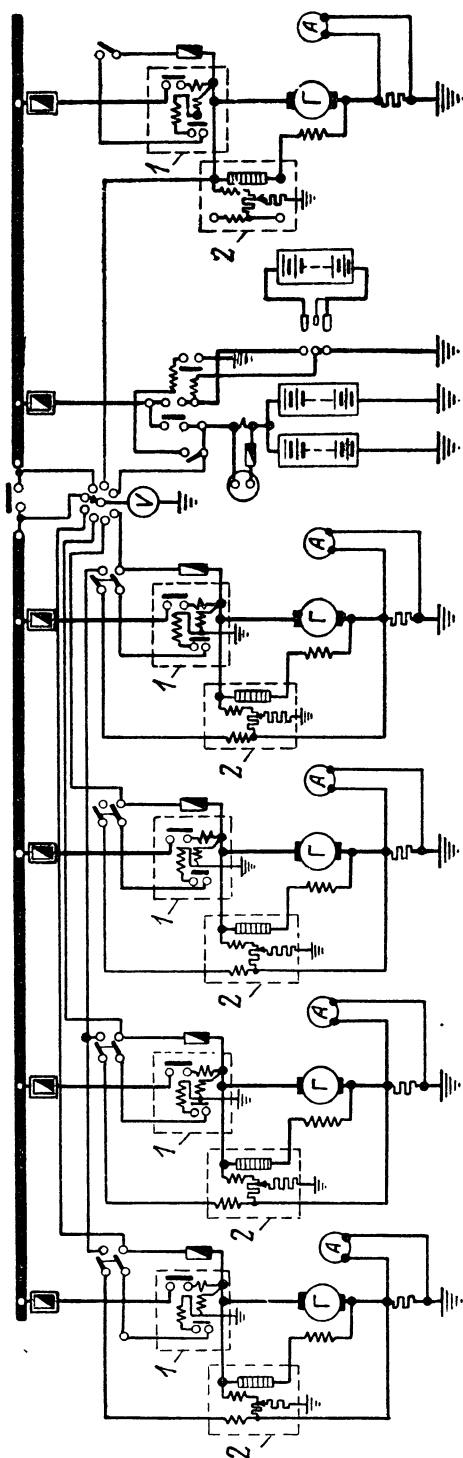
Фиг. 16.21. Принципиальная схема энергетического узла одномоторного самолета.

и пр.), на принципиальных схемах не изображаются. В настоящее время еще нет единого стандарта для условного обозначения элементов электрооборудования и электрической сети самолета. В приложении на стр. 463—475 приведены наиболее распространенные обозначения некоторых элементов электрооборудования и электрической сети самолета.

В качестве примера на фиг. 16. 21 и 16. 22 изображены принципиальные схемы энергетических узлов одно-моторного и многомоторного самолетов.

Иногда для удобства чтения принципиальных схем при их изображении цепи, через которые проходят большие рабочие токи электрифицированных установок (силовые цепи), выделяют жирными линиями, как это показано на фиг. 16. 21 и 16. 22. В некоторых случаях, когда в принципиальную схему какого-либо электрифицированного устройства входит сложная аппаратура, для наглядности и удобства чтения схемы внутренние соединения в этой сложной аппаратуре не изображают, а ограничиваются показом соединения внешних зажимов этой аппаратуры с остальной схемой (фиг. 16. 23). В случае необходимости внутренние соединения в этой аппаратуре изображаются на отдельной принципиальной схеме. Обозначения отдельных элементов могут даваться как на самой схеме, так и в специальной спецификации.

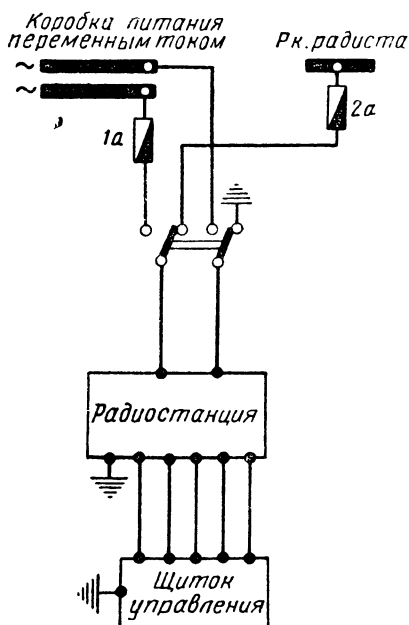
Полумонтажные схемы. Принципиальные схемы дают возможность уяснить принцип действия и электрическую связь между элементами электрифицированных установок самолета. Однако из принципиальной схемы не видно, как расположены элементы схемы относительно друг друга, проводами какого сечения соединяются они друг с другом, как расположены эти провода (в жгутах или нет) и т. д. Для возможности получить все эти сведения, необходимые для проектирования и расчета электрической сети, составляются полумонтажные схемы. На полумонтажной схеме, которая изображается часто на контуре самолета или части его, наносят



Фиг. 16. 22. Принципиальная схема энергетического узла многомоторного самолета.
1—реле обратного тока, 2—регулятор напряжения.

условные обозначения элементов электрооборудования и системы передачи и распределения электрической энергии, располагая их относительно друг друга приблизительно так, как они расположены в действительности. На полумонтажных схемах изображаются все элементы, в том числе и все щитки, распределительные коробки и штепсельные разъемы.

Соединение отдельных элементов схемы между собой показано так, как оно осуществляется в действительности: если провода проложены в жгуте, то на схеме этот жгут изображается в виде сплошной толстой



Фиг. 16. 23. Принципиальная схема питания радиостанции.

линии, концы которой расходятся так же, как это бывает в действительности.

Если соединение некоторых элементов схемы осуществляется единичными проводами, то они изображаются в виде сплошной тонкой линии. При этом точное расположение жгутов и проводов на полумонтажной схеме не показывается. На полумонтажных схемах указывается расчетное сечение проводов, их ориентировочная длина, а иногда и способ прокладки проводов в жгутах (в коробе, чулке, трубе и т. д.) и обозначения проводов и жгутов.

К полумонтажной схеме составляется спецификация электрооборудования и элементов системы передачи и распределения электрической энергии.

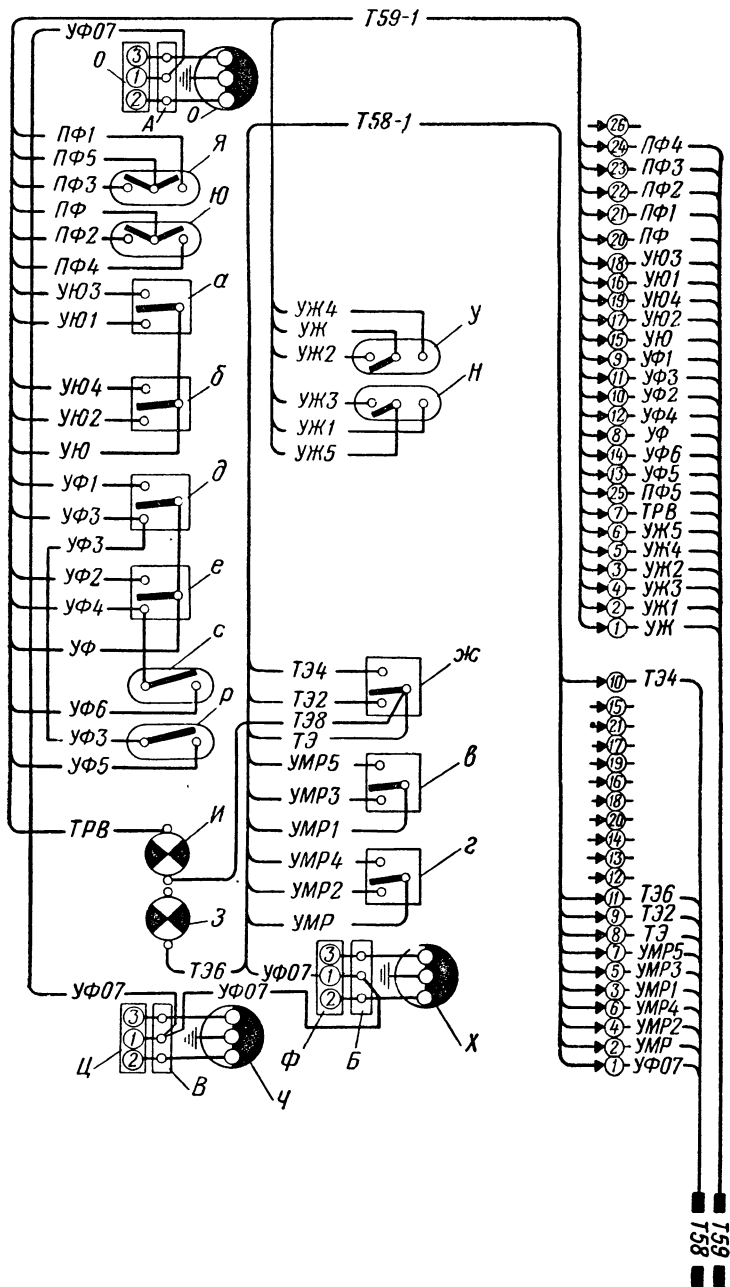
Помимо этого, к полумонтажной схеме в некоторых случаях прилагается спецификация проводов и жгутов электрической сети, в которой указаны места прокладки проводов или жгутов, сечения и обозначения проводов, откуда и куда идут провода и заделка их концов.

В качестве примера на фиг. 16. 24 изображена полумонтажная схема электрооборудования самолета-истребителя.

Фидерные схемы. Современные самолеты сильно насыщены электрооборудованием и имеют очень разветвленные электрические сети. Поэтому полумонтажные схемы получаются весьма сложными и громоздкими. Для облегчения работ по монтажу, проверке и ремонту электрических сетей, а также для облегчения расчета сетей вычерчиваются фидерные схемы. Они представляют собой по существу полумонтажные схемы группы потребителей одного наименования или группы потребителей, имеющих общий аппарат защиты.

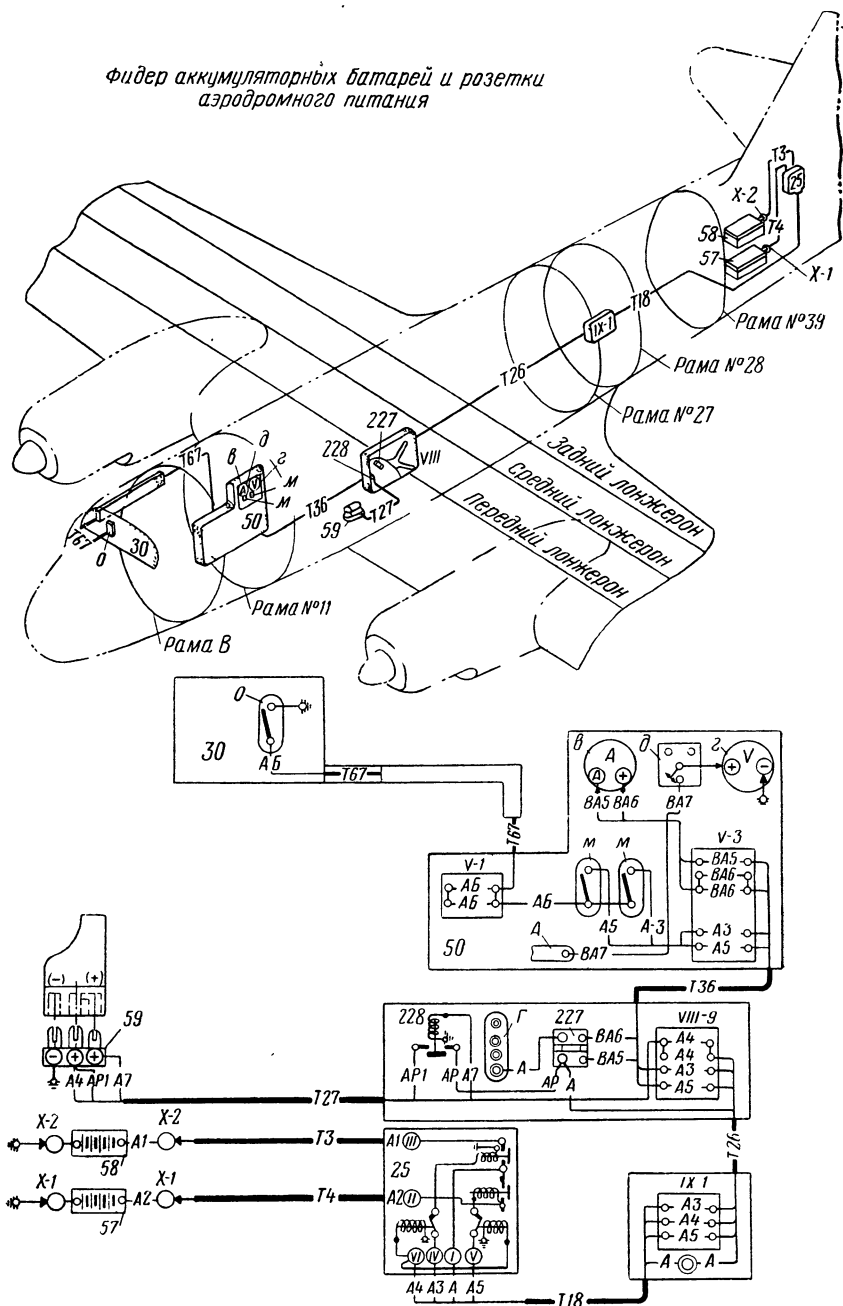
Наиболее распространены эксплуатационные фидерные схемы, которые служат для быстрой ориентировки в самолетных электрических сетях при эксплуатации электрооборудования самолетов. Эти фидерные схемы вычерчиваются следующим образом. На контуре самолета или большей частью на изометрической проекции контура самолета наносятся в условных изображениях все элементы электрифицированных агрегатов и системы передачи и распределения электрической энергии, относящиеся к рассматриваемому фидеру или группе одноименных потребителей, а также способы прокладки проводов рассматриваемых электрических цепей. Затем обозначенные на контуре самолета элементы выносятся стрелкой на свободное место вне контура самолета, и изображаются

разделка проводов жгута, подходящего к этому элементу, и схема внутренних соединений этого элемента. После этого наносятся обозначения проводов и жгутов и составляется спецификация к фидерной схеме. Как

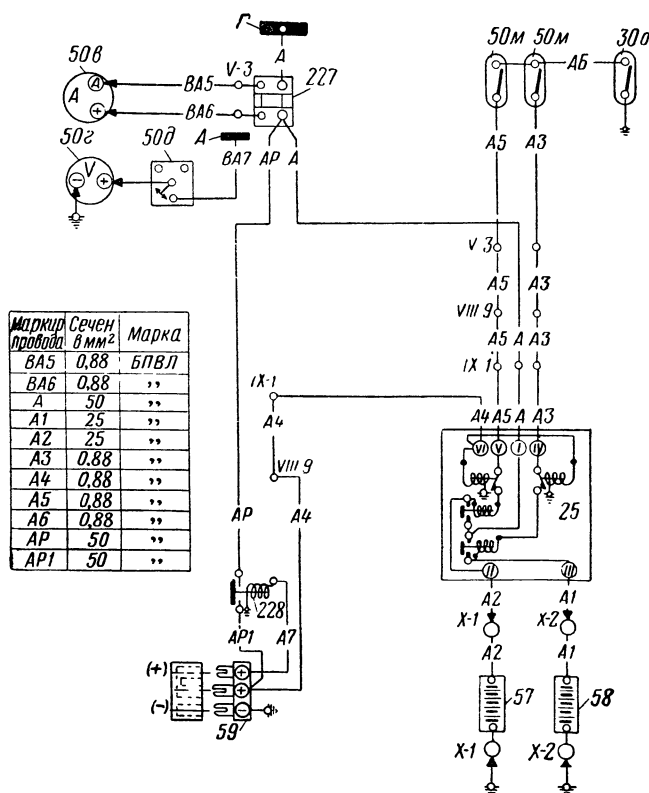


Фиг. 16.24. Полумонтажная схема электрооборудования истребителя.

правило, здесь же в углу или там, где осталось свободное место, изображается принципиальная схема, соответствующая данной фидерной схеме. На фиг. 16.25 изображена такая типовая фидерная схема. В таком виде фидерные схемы получили очень большое распространение.



Фиг. 16. 25. Типовая



№ позиции по схеме	Индекс аппарата по схеме	Наименование	Количество	Тип аппарата	Место установки
25		Агрегат выключения аккумулятора	1	2-литр РН 3	В хвостовой отсеке
30		Электрощиток пилота с аппаратом	1	УЗР 3-9а	В кабине пилотов
	0	Аварийный выключатель аккумулятора	1	В-45	На электрощитке
50		Центральный распределительный щит	1	УЗР 3-9а	В кабине радиста
	в	Амперметр аккумулятора	1	А-46	В ЦРЩ
	г	Вольтметр	1	В-46	В ЦРЩ
	д	Переключатель вольтметра	1	П2НН-45	В ЦРЩ
	м	Выключатель нижнего аккумулятора	1	В-45	В ЦРЩ
	н	Выключатель верхнего аккумулятора	1	В-45	В ЦРЩ
57		Нижний аккумулятор	1	12А-30	В хвостовой отсеке
58		Верхний аккумулятор	1	12А-30	В хвостовой отсеке
59		Розетка аэродвигательного питания	1	УЗР 3-9а	Рамы ф-жа №15-16
г		Шина центрального разъема	1	УЗР 3-9а	В центр. разъеме
227		Щит амперметра аккумулятора	1	А-46	Там же
228		Реле розетки аэродвигательного питания	1	К 2006	Там же
	г	Шина центрального разъема	1	УЗР 3-9а	Рамы ф-жа №15-16
	а	Шина питания основных фидеров	1	УЗР 3-9а	В ЦРЩ
		Разъемы			
у-1		Разъем центрального распредел. щита	1	УЗР 3-9а	В ЦРЩ
у-3		Разъем центрального распредел. щита	1	УЗР 3-9а	В ЦРЩ
уш-9		Центральный разъем	1	УЗР 3-9а	В фюзеляж Р №16-17
ix-1		Разъем обери	1	УЗР 3-9а	В фюзеляж рама №34
х-2		Разъем верхнего аккумулятора	1	Б2К	
х-1		Разъем нижнего аккумулятора	1	Б2К	

фидерная схема.

Кроме таких эксплуатационных фидерных схем, составляются иногда расчетные фидерные схемы, служащие для расчета электрической сети самолета. Эти схемы изображаются на ортогональных проекциях контура самолета с указанием в них всех переходных контактов, сечений проводов и их длины. Внутренние соединения элементов электрооборудования в этих фидерных схемах обычно не наносятся.

Монтажные схемы. Монтажные схемы служат для монтажа электрооборудования в строгом соответствии с установленным заранее порядком. Монтажная схема является основным техническим документом для монтажа электрических сетей и для проверки правильности проведения монтажа. Монтажная схема наносится в соответствующем масштабе на общий вид той части самолета, к которой относится монтаж данного электрооборудования и элементов системы передачи и распределения электрической энергии. При этом в соответствующем масштабе наносятся все электрические агрегаты, распределительные устройства и те детали самолета и оборудования, которые имеют прямое отношение к монтажу. Все жгуты и провода наносятся на монтажную схему в точном соответствии с тем, как они проложены в действительности, проставляются также размеры, необходимые для их прокладки по самолету. Для уяснения отдельных узлов, крепления и прокладки жгутов и проводов иногда даются чертежи отдельных сечений и виды по стрелкам, изображенным на общем виде. Для отдельных элементов электрической сети самолета (распределительных щитков, центральных распределительных устройств, пультов управления, приборных досок и т. п.) составляются агрегатные монтажные схемы, используемые при монтаже этих агрегатов вне самолета. Чертятся эти схемы так же, как и монтажные, в масштабе и на общем виде так, чтобы по этой схеме можно было правильно уложить любой жгут и провод. В процессе производства для облегчения монтажа, помимо агрегатных монтажных схем, применяются эталоны (смонтированные по всем правилам образцы агрегатов), которые служат для того, чтобы контролировать правильность произведенного монтажа.

Глава XVII

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ САМОЛЕТА

§ 17.1. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА САМОЛЕТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Расчет электрических сетей самолета неразрывно связан с их проектированием. При проектировании электрической сети самолета устанавливаются система передачи и распределения электрической энергии на самолете, конфигурация электрической сети, длина отдельных проводов, места разъемов и различных контактных соединений, места прокладки проводов и жгутов и т. д.

После составления эскиза электрической сети должен быть произведен расчет, на основании которого вносятся коррективы в проект электрической сети самолета, а в некоторых случаях расчет электрической сети даже может привести к коренной переделке всего проекта электрической сети самолета.

Расчет электрической сети самолета сводится к определению сечения проводов на основании допустимых электрических нагрузок на провода или на основании соображений механической прочности, а также к проверке выбранных сечений электрических проводов на величину потери напряжения в этих проводах.

В некоторых случаях, например, для участков питательной сети, задача может ставиться несколько иначе; сначала необходимо произвести расчет сечения электрических проводов по заданной допустимой потере напряжения, а затем проверить полученные величины сечений проводов на допустимую нагрузку по нагреву.

Расчет сечения проводов на допустимую нагрузку является по существу расчетом проводов на допустимый нагрев и имеет целью определить такое сечение проводов, при котором температура нагрева этих проводов будет меньше температуры, которая допускается по нормам для заданной изоляции. При этом для самолетных электрических проводов устанавливается нижняя граница сечения провода, так как применение сечений, меньших этой нижней границы, может привести к разрывам токоведущей жилы провода в процессе эксплуатации. По старым нормам нижней границей было сечение в $0,75 \text{ мм}^2$, теперь на основании опыта Великой Отечественной войны и усовершенствования методов монтажа допускаются сечения в $0,35 \text{ мм}^2$.

Расчет сечения проводов на допустимую потерю напряжения имеет целью обеспечить работу потребителей электрической энергии при такой величине напряжения на их зажимах, которая гарантирует бесперебойную работу их.

Чтобы произвести расчет проводов электрической сети самолета на допустимые нагрузки и потери напряжения, необходимо знать токораспределение в отдельных цепях электрической сети самолета для задан-

ного расчетного режима работы. В ряде случаев такое токораспределение находится просто по заданным нагрузкам работающих потребителей, однако в случае сложных замкнутых сетей токораспределение найти сразу не представляется возможным. Поэтому перед расчетом электрической сети самолета на допустимые нагрузки и потери напряжения необходимо решить задачу по нахождению токораспределения в отдельных цепях электрической сети при заданном режиме работы. Задача эта для сложных многократно замкнутых сетей может оказаться довольно трудоемкой и отнять больше времени, чем непосредственный расчет этих цепей на допустимые нагрузки и потери напряжения.

§ 17.2. РАСЧЕТ ПРОВОДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ САМОЛЕТА НА НАГРЕВ

Расчет изолированных проводов электрической сети самолета на нагрев представляет значительные трудности вследствие невозможности оценить теплоотдачу нагреваемого током провода в окружающую среду. Один и тот же провод на своем пути может проходить в открытых жгутах, в трубах, в хорошо вентилируемом пространстве или в закрытой части самолета и т. д.

Естественно, что теоретический расчет нагрева такого провода весьма затруднителен. Поэтому при определении температуры нагрева проводов обычно прибегают к опытным данным. Тем не менее теоретический расчет на нагрев позволяет оценить относительную тепловую нагрузку проводов при различных режимах их работы и получить ориентировочные данные о температуре нагрева провода при заданной нагрузке.

Предельный нагрев авиационных проводов благодаря высокому качеству изоляции и сравнительно непродолжительному сроку их службы принимается большим предельных норм нагрева, установленных для проводов электрических сетей наземных стационарных устройств.

Предельный нагрев резиновой изоляции авиационных проводов при длительной нагрузке установлен не выше 90°C (перегрев в 70°C при температуре окружающей среды в 20°C).

В условиях эксплуатации провода самолетной электрической сети могут находиться под длительной, кратковременной и повторно-кратковременной нагрузками.

Наиболее тяжелым режимом работы для провода является длительная нагрузка. Поэтому допустимая температура нагрева провода, работающего в длительном режиме, должна быть меньше допустимой температуры нагрева провода при кратковременной или повторно-кратковременной нагрузке. Так, при кратковременной нагрузке температура перегрева провода может быть доведена до $100\text{—}120^{\circ}\text{C}$ и даже больше в зависимости от окружающих условий и времени действия нагрузки. Это обстоятельство является весьма существенным, так как на самолете большинство электрических нагрузок носит кратковременный или повторно-кратковременный характер.

В основе расчета тепловых режимов самолетных проводов положена теория нагревания и охлаждения однородных тел.

Охлаждение провода осуществляется в основном за счет конвекции (примерно на $80\text{—}85\%$) и частично за счет лучеиспускания ($15\text{—}20\%$). За счет теплопроводности провод практически не охлаждается.

Если принять провод как однородное тело и пренебречь изменением сопротивления и теплоемкости при изменении температуры, то его нагрев происходит по следующему закону:

$$\theta = \theta_0 + \tau_{\text{уст}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (17.1)$$

где ϑ — температура провода;
 ϑ_0 — начальная температура провода, принимаемая равной температуре окружающей среды;

$T = \frac{c_n G_n}{k S_n}$ — постоянная времени нагрева;

c_n — удельная теплоемкость провода;

G_n — вес провода с изоляцией;

k — коэффициент теплоотдачи;

S_n — наружная поверхность провода;

$\frac{I^2 R}{k S_n} = \tau_{уст}$ — установившееся превышение температуры нагрева, равное $(\vartheta_y - \vartheta_0)$;

I — ток, протекающий по проводу;

R — сопротивление провода.

Если необходимо знать лишь превышение температуры провода над температурой окружающей среды, то последней формуле придают такой вид:

$$\tau = \vartheta - \vartheta_0 = \tau_{уст} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right). \quad (17.2)$$

Из последнего уравнения нетрудно найти и время, необходимое для нагрева провода до превышения температуры, равного τ :

$$t = T \ln \frac{\tau_{уст}}{\tau_{уст} - \tau}. \quad (17.3)$$

На фиг. 17.1 изображена кривая нагрева провода при длительной нагрузке. Установившееся превышение температуры достигается практически через время, равное пятикратному значению постоянной времени T .

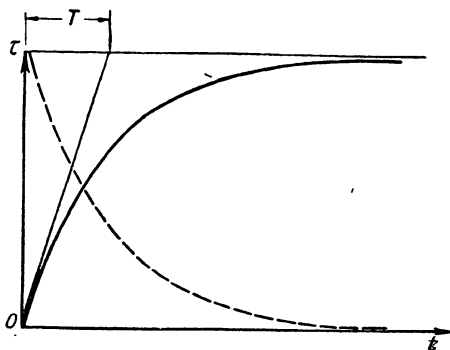
Охлаждение провода происходит по следующему закону:

$$\vartheta = \vartheta_0 + (\vartheta_{нач} - \vartheta_0) e^{-\frac{t}{T}} \quad (17.4)$$

или для превышения температуры

$$\tau = \tau_{нач} e^{-\frac{t}{T}}, \quad (17.5)$$

где $\vartheta_{нач}$ и $\tau_{нач}$ — температура и превышение температуры провода в момент начала охлаждения.



Фиг. 17.1. Кривые нагрева и охлаждения провода при длительной нагрузке.

Кривая охлаждения провода является зеркальным отображением кривой нагрева относительно прямой $\tau = \frac{\tau_{уст}}{2}$ и изображена на фиг. 17.1 пунктиром.

Из выражения $\tau_{уст} = \frac{I^2 R}{k S_n}$ можно сделать вывод, что превышение температуры провода в установившемся состоянии (при $t \rightarrow \infty$) не зависит от теплоемкости провода c_n , а определяется лишь нагрузкой провода, т. е. мощностью потерь в меди, равной $P_j = I^2 R$, поверхностью охлаждения провода S_n и условиями охлаждения, от которых зависит коэффи-

циент k . Следовательно, для уменьшения превышения температуры провода в длительном режиме необходимо обеспечить хорошее охлаждение его.

Таким образом, для установившегося значения превышения температуры провода при длительной нагрузке, если принять провод с расположенной на нем изоляцией за однородное тело, получается

$$\tau_{\text{уст}} = \frac{I^2 R}{k S_{\text{п}}}. \quad (17.6)$$

Если величина допустимого установившегося превышения температуры задана и равна $\tau_{\text{доп}}$, то последнее выражение позволяет найти допустимую величину плотности тока.

Принимая во внимание, что

$$R = \rho \frac{l}{s}, \quad (17.7)$$

где R — сопротивление провода;

ρ — удельное сопротивление материала провода;

l — длина провода;

$s = \frac{\pi d^2}{4}$ — сечение провода,

для допустимой величины плотности тока получают

$$j_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{4kS_{\text{п}}\tau_{\text{доп}}}{\rho l \pi d^2}}.$$

Так как $S_{\text{п}} = \kappa \pi d l$, где κ — коэффициент, равный отношению диаметра провода с изоляцией к диаметру голого провода ($\kappa > 1$), то

$$j_{\text{доп}} = 2 \sqrt{\frac{k \kappa \tau_{\text{доп}}}{\rho d}}. \quad (17.8)$$

Из последней формулы следует, что допустимая плотность тока увеличивается с уменьшением диаметра токоведущей жилы провода. Это очень важное свойство позволяет в некоторых случаях за счет использования не одного провода, а нескольких, соединенных параллельно, уменьшить вес проводов при заданной нагрузке.

Очевидно, что изоляция провода находится в неодинаковых тепловых условиях. Наиболее нагретым слоем изоляции будет тот, который прилегает к самому проводу.

При монтаже проводов электрической сети на самолете обычно эти провода собираются в жгуты, причем число проводов в жгуте может достигать значительной величины, доходящей до нескольких десятков. Несмотря на то, что теплоотдача проводов, находящихся в глубине жгута, как показывают исследования, больше теплоотдачи одиночного провода, все же оказывается, что в подавляющем большинстве случаев провода в глубине жгута находятся в более тяжелых тепловых условиях вследствие того, что по окружающим их проводам протекают токи, повышающие температуру окружающей среды. Поэтому допустимую нагрузку на провода, проходящие в жгуте, следует брать меньше, чем на одиночные провода.

Выше указывалось, что при кратковременном режиме нагрузка на провода может быть допущена большей, чем при длительной работе.

Кратковременной нагрузкой провода считается такая, при которой провод не успевает нагреться до установившейся температуры за время прохождения по нему тока, а после выключения тока провод остается без тока в течение времени, практически достаточного для остывания его до температуры окружающей среды.

К кратковременным нагрузкам могут быть отнесены также токи короткого замыкания, длительность протекания которых обычно весьма кратковременна. В случаях когда нагрузка провода длится очень короткое время, можно считать, что процесс нагрева протекает адиабатически, т. е. все тепло, подводимое к проводу, идет на повышение его температуры, не рассеиваясь в окружающую среду.

Как известно, в этом случае превышение температуры не зависит от теплоотдачи и может быть представлено так:

$$\tau = \vartheta - \vartheta_0 = \frac{I^2 R}{c_n G_n} t. \quad (17.9)$$

Таким образом, в отличие от нагрева при длительной нагрузке превышение температуры провода при заданной кратковременной нагрузке определяется нагрузкой, удельной теплоемкостью провода и весом, причем превышение температуры тем меньше, чем больше общая теплоемкость.

Выражение для превышения температуры провода при кратковременной нагрузке можно преобразовать, заменив R через $\frac{\rho l}{s}$,

$$I^2 R = I^2 \frac{\rho l}{s},$$

$$j = \frac{I}{s},$$

$$G_n = \gamma s l,$$

где I — ток нагрузки;

ρ — удельное сопротивление провода;

l — длина провода;

s — площадь поперечного сечения проводника;

γ — удельный вес материала провода;

$$\tau = j^2 \frac{\rho}{c_n \gamma} t. \quad (17.10)$$

Если допустимое превышение температуры $\tau_{\text{доп}}$ задано, то допустимая плотность тока равна

$$j_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{c_n \gamma \tau_{\text{доп}}}{\rho t}}. \quad (17.11)$$

Из последней формулы следует, что в отличие от длительной нагрузки здесь допустимая плотность тока не зависит от диаметра провода.

Следует иметь в виду, что формула (17.11) справедлива в предположении постоянства тока нагрузки. При расчете нагрева проводов от токов короткого замыкания, пусковых токов и пр., сильно изменяющихся во времени, формула (17.10) принимает вид

$$\tau = \frac{\rho}{c_n \gamma} \int_0^t \left(\frac{i}{s} \right)^2 dt. \quad (17.12)$$

Последний интеграл можно взять только в случае, если известен закон изменения плотности тока во времени. Если этот закон задается, то величину интеграла можно найти, произведя численное или графическое интегрирование.

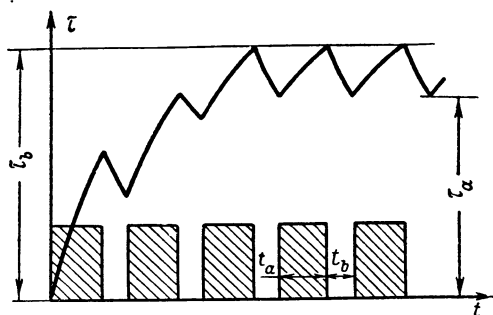
При повторно-кратковременной нагрузке (фиг. 17.2) максимальное превышение температуры можно найти следующим образом. За время t_a

провод нагреется на величину $(\tau_b - \tau_a)$, где τ_b — максимальное превышение температуры при повторно-кратковременной нагрузке, а τ_a — нижняя граница превышения температуры при установившемся повторно-кратковременном режиме. За время t_a нагрев происходит по закону

$$(\tau_b - \tau_a) = (\tau_\infty - \tau_a) \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}}\right), \quad (17.13)$$

где τ_∞ — установившееся превышение температуры при длительной нагрузке;

T — постоянная времени нагрева провода.



Фиг. 17. 2. Нагрев провода при повторно-кратковременной нагрузке.

При установившемся режиме за время t_b провод охладится до превышения температуры τ_a :

$$\tau_a = \tau_b e^{-\frac{t_b}{T}}. \quad (17.14)$$

Подставляя выражение (17.14) в (17.13), получают

$$\tau_b \left(1 - e^{-\frac{t_b}{T}}\right) = (\tau_\infty - \tau_b e^{-\frac{t_b}{T}}) \left(1 - e^{-\frac{t_a}{T}}\right),$$

откуда

$$\tau_b = \tau_{уст} = \tau_\infty - \frac{1 - e^{-\frac{t_a}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_a + t_b}{T}}}. \quad (17.15)$$

Таким образом, зная время включения нагрузки t_a и время выключения t_b , можно по известной величине установившегося превышения температуры при длительной нагрузке найти максимальное превышение температуры провода при повторно-кратковременной нагрузке.

§ 17.3. ВЫБОР СЕЧЕНИЯ ПРОВОДОВ ПО ДОПУСТИМЫМ НАГРУЗКАМ ИЗ УСЛОВИЙ НАГРЕВА

Выше указывалось, что определение температуры перегрева проводов сопряжено с большими трудностями вследствие невозможности учесть условия охлаждения отдельных частей проводов, проходящих в различных местах самолета. Приведенные выше расчеты перегрева проводов дают лишь качественную картину влияния на нагрев проводов различных факторов. Поэтому при практических расчетах выбор сечения проводов производится по таблицам допустимых нагрузок, составленным

на основании точных теоретических расчетов и результатов экспериментальных исследований.

Установленные таким образом таблицы нагрузок являются весьма ценным справочным материалом, необходимым при всех расчетах электрических сетей.

Нагрев провода свыше допустимой температуры определяется свойствами и качеством применяемой изоляции. При нагреве провода до температуры, превышающей допустимую, сначала появляется запах гари и дым, свидетельствующие о том, что изоляция провода начинает обугливаться; затем, при дальнейшем нагреве, наступает разрушение изоляции, а после — ее плавление или горение. Допустимая нагрузка на провода берется такой, чтобы было исключено появление запаха гари и дыма от изоляции при самых неблагоприятных условиях охлаждения.

В настоящее время еще нет единых норм допустимых нагрузок для самолетных изолированных проводов при различных режимах их работы.

В табл. 17.1 приведены нормы токовых нагрузок на самолетные провода марки БПВЛ, при условии что допустимая температура нагрева проводов равна 90°C .

Таблица 17.1

Проект норм нагрузок самолетных проводов марки БПВЛ и БПВЛЭ

Сечение провода в мм^2	Максимально допустимый ток длительной нагрузки при индивидуаль- ной прокладке в а	Максимально допустимый ток длительной нагрузки при групповой прокладке в а	Сечение провода в мм^2	Максимально допустимый ток длительной нагрузки при индивидуаль- ной прокладке в а	Максимально допустимый ток длительной нагрузки при групповой прокладке в а
0,35	11	7	6,00	67	50
0,50	14	10	8,80	85	62
0,75	18	13	10,0	92	68
0,88	20	15	13,0	110	80
1,00	22	16	16,0	125	94
1,25	25	18	21,0	150	110
1,50	28	20	25,0	165	124
1,93	33	24	35,0	205	150
2,50	40	28	41,0	225	170
3,00	44	32	50,0	260	190
4,00	52	38	70,0	320	240
5,15	60	45	95,0	390	290

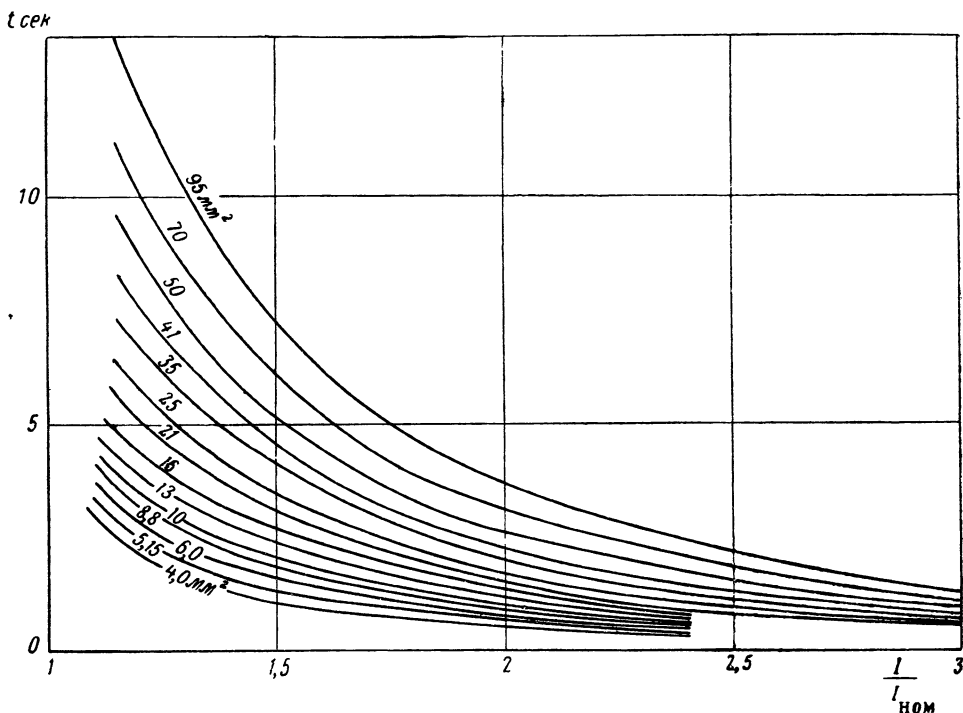
Выбор сечения провода при длительной нагрузке сводится к подбору сечения провода по номинальной нагрузке так, чтобы удовлетворялось неравенство

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{раб}},$$

где $I_{\text{доп}}$ — допустимый ток провода, взятый из табл. 17.1;

$I_{\text{раб}}$ — наибольший рабочий ток провода.

Для кратковременных и повторно-кратковременных режимов работы, как уже указывалось выше, для одной и той же допустимой температуры нагрева нагрузка на провода может быть взята значительно большей.



Фиг. 17.3. Допустимые кратковременные нагрузки проводов марки БПВЛ.

На фиг. 17.3 приведено семейство зависимостей допустимого времени действия перегрузки на провода марки БПВЛ от кратности перегрузки (отношения тока перегрузки к допустимому длительному току) для различных сечений проводов.

§ 17.4. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ РАСЧЕТА ПРОВОДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НА ПОТЕРИ НАПРЯЖЕНИЯ

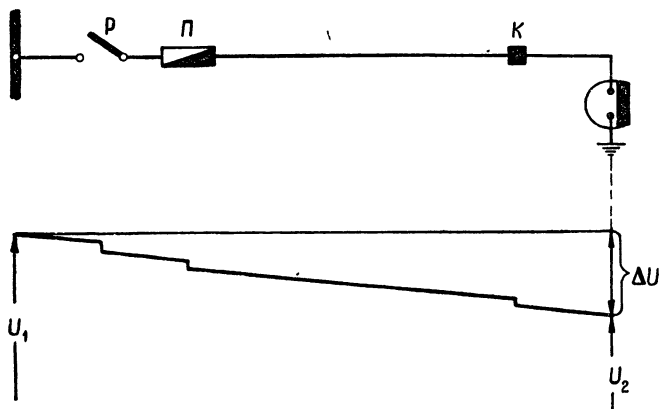
При электрических расчетах самолетных электрических сетей различают два понятия — падение напряжения и потерю напряжения. Падением напряжения называется геометрическая разность напряжений в начале и в конце линии, а потерей напряжения — их алгебраическая разность. Для постоянного тока эти два понятия совпадают.

Вследствие падения напряжения в сопротивлениях электрических проводов и контактных соединениях напряжение на зажимах потребителей электрической энергии во время их работы меньше напряжения на зажимах генераторов.

На фиг. 17.4 изображена потенциальная диаграмма для участка самолетной электрической сети постоянного тока от шин генератора до самолетной фары. Из этой потенциальной диаграммы видно, что напряжение на зажимах фары меньше напряжения генератора на величину падения напряжения в соединительных проводах, в рубильнике P , в предохранителе Π и в контактной колодке K . Величина потери напряжения от шин генератора до фары выражается в данном случае как сумма падений напряжений во всех сопротивлениях, через которые протекает ток фары:

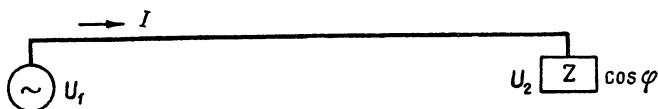
$$\Delta U = \sum_{k=1}^{k=n} I r_k. \quad (17.16)$$

Для переменного тока определение потери напряжения несколько усложняется за счет того, что вектор падения напряжения в сопротивлении может не быть в фазе с напряжением в начале и в конце линии.



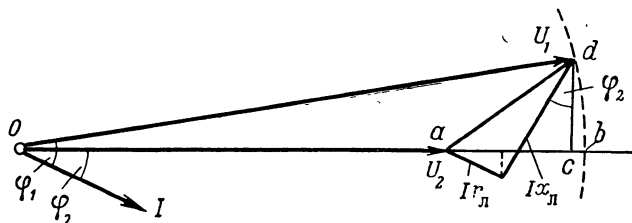
Фиг. 17.4. Потенциальная диаграмма участка электрической сети.

Ниже рассматривается простейшая цепь переменного тока, представляющая собой линию, на конце которой включена нагрузка, имеющая индуктивный характер.



Фиг. 17.5. Простейшая сеть переменного тока.

На фиг. 17.5 представлена эта цепь в однолинейном изображении. На фиг. 17.6 изображена векторная диаграмма напряжений, соответствующая данному случаю.



Фиг. 17.6. Векторная диаграмма токов и напряжений для простейшей сети переменного тока.

Ток нагрузки I отстает от напряжения на конце линии U_2 на угол φ_2 , обусловленный индуктивным характером нагрузки.

Для построения вектора напряжения U_1 от конца вектора U_2 необходимо отложить вектор падения напряжения в активном сопротивлении линии $I r_{\text{л}}$, совпадающий по фазе с током I , и вектор падения напряжения в индуктивном сопротивлении линии $I x_{\text{л}}$. Вектор, соединяющий концы векторов U_2 и $I x_{\text{л}}$ и представляющий собой геометрическую разность напряжений в начале и в конце линии, является вектором падения напряжения в линии.

На векторной диаграмме потеря напряжения в линии изображается отрезком между концом вектора U_2 (точка a) и точкой пересечения дуги

окружности радиуса U_1 , проведенной из точки O , с продолжением вектора U_2 (точка b).

Приблизительно величину потери напряжения можно принять равной проекции вектора падения напряжения $I r_{\lambda}$ на вектор U_2 (отрезок ac). Нетрудно видеть, что в этом случае величина потери напряжения равна

$$\Delta U = I(r_{\lambda} \cos \varphi_2 + x_{\lambda} \sin \varphi_2). \quad (17.17)$$

Легко понять, что при постоянном токе потеря напряжения равна:

$$\Delta U = I r_{\lambda}.$$

Очевидно, для потребителей более важной является не величина падения напряжения в линии, а величина потери напряжения, определяющая напряжение в конце линии. В некоторых случаях потеря напряжения до потребителя энергии может быть настолько большой, что потребитель будет работать ненормально и даже может выйти из строя.

Например, понижение напряжения на зажимах ламп накаливания на 10% снижает световой поток, даваемый ими, приблизительно на 30%, а это уже резко снижает видимость сигнальных огней. Вращающийся момент электродвигателей пропорционален квадрату приложенного напряжения. При большой потере напряжения двигатель может не сдвинуться с места, что приведет к перегреву обмотки якоря двигателя, находящегося в режиме короткого замыкания.

Скорость вращения самолетных электродвигателей снижается при уменьшении напряжения на их зажимах, благодаря чему снижается производительность рабочего механизма. Доброкачественная работа измерительных электрических приборов (термометров, бензиномеров и т. д.) гарантируется лишь в определенных пределах изменения подводимого к ним напряжения. Работа подавляющего числа потребителей электроэнергии на самолете ухудшается с уменьшением приложенного напряжения против номинальной величины. Поэтому для каждого потребителя электрической энергии на самолете устанавливается минимально допустимое напряжение на его зажимах, при котором обеспечивается его безотказная работа.

Исходя из этого определяют допустимые потери напряжения от шин центрального распределительного устройства, на которых напряжение должно быть равно номинальному до того или иного группового щитка или потребителя. Потери напряжения от генераторов до шин центрального распределительного устройства компенсируются соответствующим регулированием напряжения на зажимах генераторов.

Для двухмоторного самолета на постоянном токе с номинальным напряжением на шинах генераторов 28,5 в допустимые потери напряжения в самолетной электрической сети выражаются примерно в следующих цифрах (см. табл. 17.2):

Таблица 17.2

Допустимая потеря напряжения от шин групповых щитков до зажимов двигателей мощностью до 3000 вт	2 в
То же, но для потребителей мощностью до 500 вт	1 в
То же, для самолетных фар и ламп наружного освещения	0,8—1,4 в
То же, для электроламп внутреннего освещения	0,5 в
То же, для электроизмерительных приборов	0,5 в
Допустимая потеря напряжения от зажимов аккумуляторной батареи до шин центрального распределительного устройства	0,6 в
Допустимая потеря напряжения от шин центрального распределительного устройства до групповых щитков при максимальной нагрузке	0,3 в
То же, для штепсельной розетки аэродромного питания при максимально возможном токе	0,6 в

Исследования показывают, что в некоторых случаях экономически целесообразно доводить допустимые потери напряжения до 10—15% от номинального напряжения сети, поэтому приведенные в табл. 17.2 цифры следует рассматривать как ориентировочную нижнюю границу допустимых потерь напряжения.

Для самолетных электрических сетей переменного тока допустимые потери напряжения от шин генераторов до потребителей принимаются равными в среднем 10%.

В ряде случаев, помимо расчета электрической сети на потерю напряжения при нормальном режиме работы потребителей, необходимо произвести поверочный расчет на пусковой режим. В момент включения электрических двигателей, имеющих в момент пуска ток значительно больший номинального, потеря напряжения в подводящих проводах может быть настолько большой, что напряжение на зажимах отдельных двигателей будет недостаточным для того, чтобы они стронулись с места.

Исходными величинами при расчете электрической сети самолета на потерю напряжения являются: номинальное напряжение источников питания, электрическая нагрузка в цепи, протяженность электрической цепи и допустимые потери напряжения до рассматриваемых потребителей.

При расчете сетей постоянного тока учитываются лишь омические сопротивления проводов и контактов, при расчете сетей переменного тока необходимо учитывать активное и индуктивное сопротивления проводов.

Проводимостью для токов утечки между проводами самолетной электрической сети можно пренебречь.

§ 17.5. ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СЕТИ

а) Омическое и активное сопротивления. Самолетные электрические провода изготавливаются из меди и алюминия. Удельная проводимость меди, из которой изготавливаются жилы токоведущего кабеля, составляет $\gamma_s = 57 \text{ м/ом мм}^2$ при температуре в 20°C , а алюминия $\gamma_s = 35 \text{ м/ом мм}^2$.

В настоящее время самолетные электрические сети оборудуются в основном медными проводами, однако на ряде самолетов используются также и алюминиевые провода. В табл. 17.3 дано сравнение основных технических данных медных и алюминиевых проводов.

Таблица 17.3

Сравнительные данные медных и алюминиевых проводниковых материалов

Наименование материала	Удельный вес в г/см^3	Температура плавления в $^\circ \text{C}$	Временное сопротивление на разрыв в кг/мм^2	Удельная проводимость при 15°C в м/ом мм^2	Удельное сопротивление при 20°C в $\text{ом мм}^2/\text{м}$	Температурный коэффициент сопротивления в $1/^\circ \text{C}$	Средняя теплоемкость в $\text{ккал/кг } ^\circ \text{C}$	Теплопроводность в $\text{ккал/м } ^\circ \text{C}$
Медь	8,9	1083	25÷40	57	0,0175	0,004	0,09	3,36
Алюминий	2,7	659	14÷22	35	0,029	0,0042	0,22	1,75

Если при прохождении одного и того же тока I по алюминиевому и медному проводам нагрев изоляции получается одинаковым при устано-

вившемся тепловом режиме, то тогда справедливы следующие соотношения:

$$I^2 \frac{\rho_{э. а}}{S_a} = k_a S_a (\vartheta - \vartheta_0). \quad (17.18)$$

$$I^2 \frac{\rho_{э. м}}{S_m} = k_m S_m (\vartheta - \vartheta_0) \quad (17.19)$$

или

$$\frac{\rho_{э. а} S_m}{\rho_{э. м} S_a} = \frac{k_a S_a}{k_m S_m}. \quad (17.20)$$

Здесь S_a и S_m — наружные поверхности охлаждения алюминиевого и медного проводов;

k_a и k_m — соответствующие коэффициенты теплоотдачи алюминиевого и медного проводов с учетом диаметров последних;

s_a и s_m — площади поперечного сечения алюминиевого и медного проводов.

Наружные поверхности теплоотдачи провода зависят от толщины изоляции и диаметра провода;

$$S_a = \pi(d_a + \delta_a) \quad \text{и} \quad S_m = \pi(d_m + \delta_m).$$

Обозначая

$$\frac{\delta_a}{d_a} = \Delta_a, \quad \frac{\delta_m}{d_m} = \Delta_m,$$

находят

$$S_a = \pi(1 + \Delta_a)d_a; \quad S_m = \pi(1 + \Delta_m)d_m.$$

Приняв $\frac{k_a}{k_m} \approx \sqrt{\frac{d_m}{d_a}}$, находят

$$\frac{d_a s_a}{d_m s_m} = \frac{\rho_{э. а}}{\rho_{э. м}} \frac{(1 + \Delta_m)}{(1 + \Delta_a)} \sqrt{\frac{d_a}{d_m}}$$

или

$$\left(\frac{s_a}{s_m} \right)^{1,25} = \frac{\rho_{э. а}}{\rho_{э. м}} \frac{1 + \Delta_m}{1 + \Delta_a}$$

и отсюда, приняв $\frac{1 + \Delta_m}{1 + \Delta_a} = 1,05$, имеют

$$\frac{s_a}{s_m} = \left(\frac{\rho_{э. а}}{\rho_{э. м}} \frac{1 + \Delta_m}{1 + \Delta_a} \right)^{\frac{4}{5}} \approx 1,55.$$

Отношение весов проводников получается равным

$$\frac{G_a}{G_m} = \frac{\gamma_a}{\gamma_m} 1,55 = \frac{2,7}{8,9} 1,55 = 0,47. \quad (17.21)$$

Если исходить не из одинакового нагрева изоляции, а из одинаковой потери напряжения, то для медного провода

$$\Delta U_m = I r_m = I \frac{\rho_m l}{s_m}. \quad (17.22)$$

для алюминиевого провода

$$\Delta U_a = I r_a = I \frac{\rho_a l}{s_a}. \quad (17.23)$$

Приравнявая $\Delta U_m = \Delta U_a$, получают

$$\frac{s_m}{s_a} = \frac{\rho_m}{\rho_a} = 0,605,$$

и соотношение весов

$$\frac{G_m}{G_a} = \frac{\gamma_m}{\gamma_a} \frac{s_m}{s_a} = 2. \quad (17.24)$$

Таким образом, из формул (17.21) и (17.24) следует, что при применении алюминиевых проводов вес их может быть уменьшен в два раза по сравнению с медными при одних и тех же токовых нагрузках.

Преимуществом алюминиевых проводов перед медными является также большая теплоемкость алюминия (примерно в три раза больше, чем у меди), что позволяет допускать большую нагрузку на алюминиевые провода в кратковременных и повторно-кратковременных режимах. Однако алюминиевые провода имеют и ряд недостатков по сравнению с медными.

Во-первых, как было показано выше, сечение алюминиевых проводов должно быть несколько больше сечения медных проводов, используемых при тех же нагрузках.

Во-вторых, алюминий обладает в два раза меньшим временным сопротивлением на разрыв, чем медь. Это не позволяет применять алюминиевые провода таких же малых сечений, как медные (0,35 мм²).

В-третьих, на воздухе алюминий быстро окисляется, покрываясь тонкой оксидной пленкой, обладающей небольшой проводимостью. Оксидная пленка вызывает увеличение переходного сопротивления контактов между проводниками.

В настоящее время разработаны эффективные средства для удаления оксидной пленки и способы пайки алюминия. Для образования хорошего контакта применяется серебряное покрытие алюминиевых проводов в месте их контактирования. Однако медные провода паять и сваривать значительно удобнее и проще, чем алюминиевые.

В-четвертых, алюминиевые провода в большей степени теряют механическую прочность при длительном нагреве, чем медные. В силу указанных выше причин в ряде случаев предпочтение приходится отдавать медным проводам.

Для разветвленных электрических сетей напряжением 24—26 в применение алюминиевых проводов позволяет значительно снизить вес самолетной электрической сети, что является очень существенным и важным для современных самолетов, сильно насыщенных специальным оборудованием.

Алюминиевые провода основное применение находят в качестве питающих проводов, предназначенных для канализации больших токов. Здесь переход на алюминиевые провода дает большую экономию в весе. В распределительных самолетных электрических сетях, где применяются провода малых сечений, переход на алюминиевые провода вряд ли целесообразен, так как выигрыш в весе будет небольшим и не оправдает эксплуатационных недостатков, присущих алюминиевым проводам.

Омическое сопротивление провода, т. е. его сопротивление постоянному току, можно подсчитать по формуле (17.7):

$$R = \frac{l}{\gamma_a s},$$

где l — длина провода в м;

s — площадь поперечного сечения токонесущей части в мм²;

γ_a — удельная электрическая проводимость в м/ом мм².

Омическое сопротивление зависит от температуры провода. Приближенно зависимость сопротивления провода от температуры выражается так:

$$R_{\vartheta} = R_{\vartheta_0} [1 + \alpha (\vartheta - \vartheta_0)], \quad (17.25)$$

где R_{ϑ_0} — сопротивление при температуре ϑ_0 ;

R_{ϑ} — сопротивление при температуре ϑ ;

α — температурный коэффициент сопротивления, равный $0,004 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$.

При расчетах омического сопротивления медных самолетных проводов удельную проводимость следует брать несколько меньше приведенной выше величины $\gamma_s = 57 \text{ м/ом мм}^2$, чтобы учесть некоторое увеличение действительной длины провода вследствие скрутки жил токоведущего кабеля. Обычно при практических расчетах для самолетных многожильных проводов принимают $\gamma_s = 52,7 \text{ м/ом мм}^2$.

В цепях переменного тока действительное сопротивление провода (называемое активным) больше подсчитанного по формуле омического вследствие дополнительных потерь, возникающих в проводе за счет поверхностного эффекта и эффекта близости.

Активное сопротивление тем сильнее отличается от омического, чем больше сечение провода и частота переменного тока.

В самолетных электрических сетях переменного тока, имеющих частоту 400 гц , учитывать влияние поверхностного эффекта и эффекта близости имеет смысл лишь для сечений проводов, больших $16\text{--}20 \text{ мм}^2$. Для проводов меньшего сечения вместо активного сопротивления следует брать омическое, подсчитанное по формуле (17.7).

б) Реактивное сопротивление самолетных проводов. Самолетные провода представляют собой некоторое индуктивное сопротивление для переменного тока, тем большее, чем больше протяженность проводов и расстояние между ними.

При постоянном токе индуктивность проводов проявляется лишь в переходных процессах, когда меняется величина электрического тока. При переменном токе величина индуктивности проводов определяет реактивное сопротивление провода:

$$x_L = \omega L. \quad (17.26)$$

При двухпроводной системе передачи электрической энергии на самолете индуктивность проводов электрической сети самолета невелика, так как обычно прямой и обратный провода располагаются недалеко друг от друга. При однопроводной системе расстояние между прямым и обратным проводами значительно больше, вследствие чего возрастает и индуктивность. Индуктивность контура из прямого и обратного проводов можно подсчитать по формуле

$$L = \left(0,92 \lg \frac{D}{r} + 0,1\mu \right) 10^{-3} \text{ гн/км}, \quad (17.27)$$

где μ — относительная магнитная проницаемость материала провода (для меди и алюминия $\mu = 1$);

D — расстояние между проводами;

r — радиус провода.

Для однопроводной системы в первом приближении можно пользоваться этой же формулой, если вместо D подставить удвоенное расстояние провода от корпуса самолета.

Индуктивность одной фазы трехфазной линии выражается так:

$$L = \left(0,46 \lg \frac{D_{cp}}{r} + 0,05\mu \right) 10^{-3} \text{ гн/км}, \quad (17.28)$$

где $D_{\text{ср}}$ — среднее геометрическое расстояние между проводами. Его можно определить из формулы

$$D_{\text{ср}} = \sqrt[3]{D_1 D_2 D_3}, \quad (17.29)$$

где D_1, D_2, D_3 — расстояния между соответствующими фазовыми проводами.

Проводимостью между проводами самолетной электрической сети, как активной, так и реактивной, обычно можно пренебречь, так как сопротивление утечки сети согласно требованиям к монтажу самолетных электрических сетей составляет величину в сотни тысяч омов, а емкость между проводами и корпусом самолета весьма невелика.

в) Переходное сопротивление контактов. Как указывалось выше, электрическая сеть самолета имеет большое число контактных соединений.

На самолете к контактным соединениям предъявляются весьма жесткие требования, особенно к переходному сопротивлению контактов в минусовых цепях однопроводной самолетной электрической сети. Величину переходного сопротивления контактов точно учесть нельзя, поэтому при расчетах принимают допустимые величины для переходных сопротивлений контактов.

В табл. 17.4 приведен порядок допустимых величин переходных сопротивлений контакта для однопроводных самолетных электрических сетей постоянного тока.

Таблица 17.4

Допустимые величины переходных сопротивлений контактов для самолетных однопроводных электрических сетей

Тип контактного соединения	Допустимая величина переходного сопротивления в ом
Болтовое соединение	0,0001
Штепсельный разъем	0,0003
Контакты реле, выключателей и кнопок	0,0008
Контакты контакторов	0,0004

§ 17.6. РАСЧЕТ РАДИАЛЬНЫХ САМОЛЕТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ПОТЕРИ НАПРЯЖЕНИЯ

Расчет простых радиальных сетей

В процессе расчетов схему рассчитываемой цепи принято чертить в однолинейном изображении. При этом необходимо иметь в виду, что длину или сопротивление рассчитываемой линии или участка линии при двухпроводной системе передачи электрической энергии необходимо удваивать, чтобы учесть сопротивление обратного провода. Для однопроводной системы сопротивлением обратного провода (корпуса самолета) можно пренебречь.

На фиг. 17.7 изображена линия, питаемая в точке А и нагруженная на конце током I . Потеря напряжения в этой линии будет

$$\Delta U = \sum_{i=1}^{i=n} I r_i = I \sum_{i=1}^{i=n} r_i, \quad (17.30)$$

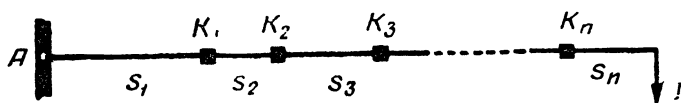
где $\sum_{i=1}^{i=n} r_i$ — сумма сопротивлений в линии.

Сопротивление линии складывается из сопротивления проводов и сопротивления контактных соединений.

При небольших нагрузках сопротивлением контактов можно пренебречь, так как сечения проводов при малых нагрузках небольшие и сопротивление их велико по сравнению с сопротивлением переходных контактов.

При больших нагрузках сопротивление контактных соединений следует учитывать.

Потери напряжения в контактных соединениях удобнее учитывать отдельно от учета потери напряжения в проводах. Для этого сначала по таблицам допустимых величин переходного сопротивления контактов в зависимости от типа контактного соединения (см. табл. 17.3) находят сопротивление для каждого контактного соединения K_i , включенного в рассчитываемый участок сети; затем, зная ток на этом участке сети, определяют потери напряжения в контактах. Суммируя все потери напряжения в последовательно включенных контактных соединениях, находят общую потерю напряжения в контактах. После этого из заданной допустимой потери напряжения в рассчитываемом участке сети вычитают найденную общую потерю напряжения в контактах и получают новую



Фиг. 17.7. Линия, нагруженная на конце.

величину допустимой потери напряжения, которая является расчетной величиной для выбора или проверки сечения провода рассчитываемой цепи. Так, если в цепи, изображенной на фиг. 17.7, имеется n контактных соединений, то можно написать

$$\Delta U_{\kappa} = I \sum_{i=1}^{i=n} r_{\kappa i}, \quad (17.31)$$

где ΔU_{κ} — общая потеря напряжения в контактах.

Если сечение линии одинаково по всей длине l , то

$$\Delta U = \Delta U_{\kappa} + I r_{\text{л}} = \Delta U_{\kappa} + I \frac{l}{\gamma_{\text{э}} s}$$

или

$$\Delta U - \Delta U_{\kappa} = I \frac{l}{\gamma_{\text{э}} s}, \quad (17.32)$$

где l — длина линии;

$\gamma_{\text{э}}$ — удельная проводимость материала провода;

s — поперечное сечение провода.

При заданном сечении провода расчет сводится к проверке неравенства

$$\Delta U_{\kappa} + I \frac{l}{\gamma_{\text{э}} s} \leq \Delta U_{\text{доп}} \quad (17.33)$$

или

$$I \frac{l}{\gamma_{\text{э}} s} \leq \Delta U_{\text{доп}} - \Delta U_{\kappa} = \Delta U'_{\text{доп}}, \quad (17.34)$$

где $\Delta U'_{\text{доп}}$ — допустимая потеря напряжения в линии с учетом потери напряжения в контактах.

Если сечение провода не задано, а является искомой величиной, то его определяют по формуле

$$s = \frac{Il}{\gamma_{\text{э}} \Delta U'_{\text{доп}}}. \quad (17.35)$$

В дальнейшем в величине $\Delta U'_{\text{доп}}$ штрих опускается, так как подразумевается, что допустимая потеря напряжения берется с учетом сопротивления контактов, если это имеет смысл делать.

Если допустимая потеря напряжения цепи задана в относительных значениях:

$$\Delta u_{\text{доп}} = \frac{\Delta U_{\text{доп}}}{U_{\text{ном}}},$$

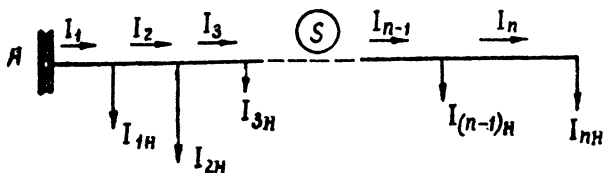
где $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение сети, то формула (17.35) принимает вид

$$s = \frac{Il}{\gamma_{\text{э}} \Delta u_{\text{доп}} U_{\text{ном}}}. \quad (17.36)$$

В некоторых случаях расчет удобнее вести не по заданному току нагрузки, а по заданной номинальной мощности потребителей:

$$P = U_{\text{ном}} I.$$

В действительности на зажимах потребителей напряжение обычно несколько меньше номинального, однако для упрощения расчетов в вы-



Фиг. 17.8. Линия с несколькими сосредоточенными нагрузками.

ражение мощности потребителя подставляют номинальное напряжение сети.

Расчетные формулы (17.33), (17.35), (17.36) принимают в этом случае вид

$$\frac{Pl}{\gamma_{\text{э}} s U_{\text{ном}}} \leq \Delta U_{\text{доп}}; \quad (17.37)$$

$$s = \frac{Pl}{\gamma_{\text{э}} \Delta U_{\text{доп}} U_{\text{ном}}}; \quad (17.38)$$

$$s = \frac{Pl}{\gamma_{\text{э}} \Delta u_{\text{доп}} U_{\text{ном}}^2}. \quad (17.39)$$

Все дальнейшие расчеты самолетных электрических сетей постоянного тока на потери напряжения выполняются в предположении, что система передачи электрической энергии на самолете однопроводная и потерей напряжения в обратном проводе (корпусе) можно пренебречь. Для участков самолетной сети, выполненной по двухпроводной системе, величины полученных потерь напряжения необходимо удваивать.

Если линия с несколькими сосредоточенными нагрузками (фиг. 17.8) питается из точки А, то потеря напряжения в линии равна

$$\Delta U = I_1 r_1 + I_2 r_2 + \dots + I_n r_n = \sum_{i=1}^n I_i r_i, \quad (17.40)$$

где I_i и l_i — токи и длины отдельных участков линии.

Если сечение линии по всей длине l неизменно, то

$$\Delta U = \frac{1}{\gamma_{\text{э}} s} \sum_{i=1}^{i=n} I_i l_i. \quad (17.41)$$

Значение тока I_i , входящее в эту формулу, может быть найдено по заданным токам нагрузки по формуле

$$I_i = \sum_{i=1}^{i=n} I_{ni} \quad (17.42)$$

Выражение (17.41) можно также записать в несколько ином виде. Если обозначить

$$L_1 = l_1; \quad L_2 = l_1 + l_2; \quad L_3 = l_1 + l_2 + l_3; \quad \dots \quad L_n = l_1 + l_2 + \dots + l_n,$$

то

$$\sum_{i=1}^{i=n} I_i l_i = \sum_{i=1}^{i=n} I_{ni} L_i,$$

где I_{ni} — ток i -той нагрузки. Поэтому выражение (17.41) принимает вид

$$\Delta U = \frac{1}{\gamma_{\Sigma S}} \sum_{i=1}^n I_{ni} L_i. \quad (17.43)$$

В последней формуле под знаком суммы стоит выражение, напоминающее выражение для момента, создаваемого в опоре балки, нагруженной сосредоточенными силами. Поэтому произведение $I_{ni} L_i$ называют иногда моментом тока.

Если сечение провода известно из расчета на нагрев или на основании соображений механической прочности, то проверяют линию на потерю напряжения по формуле

$$\frac{1}{\gamma_{\Sigma S}} \sum_{i=1}^{i=n} I_i l_i \leq \Delta U_{\text{доп}}, \quad (17.44)$$

где $\Delta U_{\text{доп}}$ — допустимая потеря напряжения для самого удаленного потребителя. Под самым удаленным потребителем подразумевается такой, который в процессе работы имеет минимальное напряжение на своих зажимах.

Примечание. Хотя самый удаленный потребитель и находится под наименее низким напряжением, однако это не означает, что расчет всегда следует вести на потерю напряжения до этого потребителя. Не исключена возможность того, что к менее удаленным потребителям могут предъявляться более жесткие требования в отношении потери напряжения. Поэтому не следует ограничиваться расчетом на самый удаленный потребитель, а всегда проверять, нет ли потребителей, находящихся в более тяжелых условиях, чем самый удаленный потребитель.

Нетрудно найти в случае необходимости и потерю напряжения для любой промежуточной нагрузки. Если требуется определить сечение провода при заданной потере напряжения до самого удаленного потребителя, то расчетная формула принимает вид

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} I_i l_i}{\gamma_{\Sigma} \Delta U_{\text{доп}}}. \quad (17.45)$$

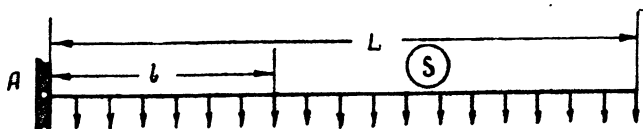
Если линия двухпроводная, то числитель должен быть умножен на 2.

Когда нагрузка задана не в виде токов, а мощностью каждого потребителя, то принимают, что в выражение для мощности можно подставлять не действительное, а номинальное значение напряжения. В результате этого формула (17.45) принимает вид

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} P_i l_i}{\gamma_{\Sigma} \Delta U_{\text{доп}} U_{\text{ном}}}. \quad (17.46)$$

Иногда радиальная линия нагружается рядом примерно одинаковых по мощности потребителей, расположенных на одинаковых расстояниях друг от друга. В этом случае можно считать, что линия нагружена равномерно распределенной нагрузкой. Расчет линии на потерю напряжения при этом значительно упрощается, а погрешность от допущения равномерности распределения нагрузки получается небольшой.

На фиг. 17.9 изображена радиальная линия с равномерно распределенной нагрузкой и одинаковым сечением.



Фиг. 17.9. Линия с равномерно распределенной нагрузкой.

Нагрузка (ток) в линии на расстоянии l от точки A составляет

$$i = I \frac{(L-l)}{L}, \quad (17.47)$$

где I — весь ток, поступающий в линию;

L — длина всей линии.

Потеря напряжения от тока i в элементе dl равна

$$d\Delta U = I \frac{(L-l)}{L} \frac{dl}{\gamma_{\text{эс}} s}. \quad (17.48)$$

Общая потеря напряжения в линии выражается так:

$$\Delta U = \int_0^L I \frac{(L-l)}{L} \frac{dl}{\gamma_{\text{эс}} s} = \frac{IL}{2\gamma_{\text{эс}} s}. \quad (17.49)$$

Следовательно, потеря напряжения в линии с равномерно распределенной нагрузкой равна той потере напряжения, которая имела бы в линии, если бы вся нагрузка была сосредоточена в середине линии.

Таким образом, расчетные формулы принимают вид

$$\frac{IL}{2\gamma_{\text{эс}} s} \leq \Delta U_{\text{доп}}; \quad (17.50)$$

$$s = \frac{IL}{2\gamma_{\text{эс}} \Delta U_{\text{доп}}}. \quad (17.51)$$

Линии с равномерно распределенной нагрузкой встречаются на самолетах довольно редко.

В выведенных выше формулах предполагалось, что сечение линии неизменно по всей ее длине. С точки зрения расхода проводникового материала такое выполнение линии нецелесообразно. С этой точки зрения более целесообразно взять различные сечения отдельных участков линии исходя из допустимой потери напряжения в конце линии. При этом может быть очень много различных вариантов выполнения линии, но существует такой вариант, который обеспечивает минимальный расход проводникового материала.

Ниже показано, как производится расчет на этот наиболее экономичный вариант для линии с сосредоточенными нагрузками.

Пусть заданы нагрузки участков линии $I_{1н}$, $I_{2н}$, $I_{3н}$ и допустимая потеря напряжения до конца $\Delta U_{доп}$ (фиг. 17. 10). Объем меди всех участков линии

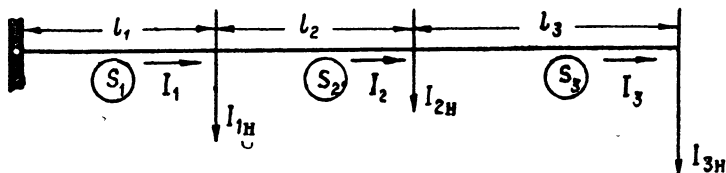
$$V = s_1 l_1 + s_2 l_2 + s_3 l_3, \quad (17. 52)$$

где s_1 , s_2 и s_3 — сечения участков линии.

Исходя из потери напряжения на соответствующих участках для s_1 , s_2 и s_3 имеют

$$s_1 = \frac{I_1 l_1}{\gamma_э \Delta U_1}; \quad s_2 = \frac{I_2 l_2}{\gamma_э \Delta U_2}; \quad s_3 = \frac{I_3 l_3}{\gamma_э \Delta U_3}, \quad (17. 53)$$

где ΔU_1 , ΔU_2 , ΔU_3 — потери напряжения до соответствующих нагрузок.



Фиг. 17. 10. Линия с минимальным весом проводникового материала.

Токи на участках сети l_1 , l_2 , l_3 выражаются через нагрузочные токи $I_{1н}$, $I_{2н}$ и $I_{3н}$ следующим образом:

$$I_1 = I_{1н} + I_{2н} + I_{3н}; \quad I_2 = I_{2н} + I_{3н}; \quad I_3 = I_{3н}.$$

Очевидно,

$$\Delta U_{доп} = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3. \quad (17. 54)$$

Подставляя значения s_1 , s_2 , s_3 в выражение (17. 52), находят

$$V = \frac{I_1 l_1^2}{\gamma_э \Delta U_1} + \frac{I_2 l_2^2}{\gamma_э \Delta U_2} + \frac{I_3 l_3^2}{\gamma_э \Delta U_3} \quad (17. 55)$$

или, подставляя вместо ΔU_3 , $\Delta U_3 = \Delta U_{доп} - \Delta U_1 - \Delta U_2$, имеют

$$V = \frac{I_1 l_1^2}{\gamma_э \Delta U_1} + \frac{I_2 l_2^2}{\gamma_э \Delta U_2} + \frac{I_3 l_3^2}{\gamma_э (\Delta U_{доп} - \Delta U_1 - \Delta U_2)}. \quad (17. 56)$$

Условие минимума последнего выражения можно найти, приравняв нулю частные производные от V по ΔU_1 и ΔU_2 :

$$\frac{\partial V}{\partial \Delta U_1} = -\frac{I_1 l_1^2}{\gamma_э \Delta U_1^2} + \frac{I_3 l_3^2}{\gamma_э \Delta U_3^2} = 0 \quad (17. 57)$$

и

$$\frac{\partial V}{\partial \Delta U_2} = -\frac{I_2 l_2^2}{\gamma_э \Delta U_2^2} + \frac{I_3 l_3^2}{\gamma_э \Delta U_3^2} = 0. \quad (17. 58)$$

Из выражений (17. 57) и (17. 58) следует

$$\frac{I_1 l_1^2}{\gamma_э \Delta U_1^2} = \frac{I_2 l_2^2}{\gamma_э \Delta U_2^2} = \frac{I_3 l_3^2}{\gamma_э \Delta U_3^2}.$$

Последние формулы можно преобразовать, умножив числитель и знаменатель каждой из дробей на одну и ту же величину:

$$\left(\frac{I_1 l_1}{\gamma_э \Delta U_1} \right)^2 \frac{\gamma_э}{I_1} = \left(\frac{I_2 l_2}{\gamma_э \Delta U_2} \right)^2 \frac{\gamma_э}{I_2} = \left(\frac{I_3 l_3}{\gamma_э \Delta U_3} \right)^2 \frac{\gamma_э}{I_3}.$$

Приняв во внимание соотношения (17.53), имеют

$$\frac{s_1^2}{I_1} = \frac{s_2^2}{I_2} = \frac{s_3^2}{I_3}. \quad (17.59)$$

Обобщая этот результат на линию с n нагрузками, получают следующее условие минимального расхода проводникового материала:

$$\frac{s_1^2}{I_1} = \frac{s_2^2}{I_2} = \dots = \frac{s_k^2}{I_k} = \dots = \frac{s_n^2}{I_n} = \alpha_i^2. \quad (17.60)$$

Следовательно, расчет сечения отдельных участков линии можно производить по формуле

$$s_i = \alpha_i \sqrt{I_i}. \quad (17.61)$$

Величину α_i можно определить по полной нагрузке и заданной потере напряжения:

$$\Delta U_{\text{доп}} = \frac{I_1 l_1}{\gamma_9 s_1} + \frac{I_2 l_2}{\gamma_9 s_2} + \frac{I_3 l_3}{\gamma_9 s_3} = \frac{\sqrt{I_1}}{s_1} \frac{\sqrt{I_1} l_1}{\gamma_9} + \frac{\sqrt{I_2}}{s_2} \frac{\sqrt{I_2} l_2}{\gamma_9} + \frac{\sqrt{I_3}}{s_3} \frac{\sqrt{I_3} l_3}{\gamma_9},$$

но

$$\frac{\sqrt{I_1}}{s_1} = \frac{\sqrt{I_2}}{s_2} = \frac{\sqrt{I_3}}{s_3} = \frac{1}{\alpha_i},$$

поэтому

$$\Delta U_{\text{доп}} = \frac{1}{\gamma_9 \alpha_i} [\sqrt{I_1} l_1 + \sqrt{I_2} l_2 + \sqrt{I_3} l_3];$$

отсюда

$$\alpha_i = \frac{\sqrt{I_1} l_1 + \sqrt{I_2} l_2 + \sqrt{I_3} l_3}{\gamma_9 \Delta U_{\text{доп}}}, \quad (17.62)$$

или, обобщая результат на n нагрузок, получают

$$\alpha_i = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} l_i \sqrt{I_i}}{\gamma_9 \Delta U_{\text{доп}}}. \quad (17.63)$$

Следует иметь в виду, что в выражениях, приведенных выше, токи I_i под знаком суммы являются токами, протекающими по отдельным участкам линии, а не токами нагрузки потребителей.

Если более удобно нагрузки иметь в виде мощностей, то формулам (17.60), (17.61) и (17.63) можно придать вид

$$\frac{s_1^2}{P_1} = \frac{s_2^2}{P_2} = \frac{s_3^2}{P_3} = \alpha_P^2; \quad (17.64)$$

$$s_1 = \alpha_P \sqrt{P_1}; \quad s_2 = \alpha_P \sqrt{P_2}; \quad s_3 = \alpha_P \sqrt{P_3}; \quad (17.65)$$

$$\alpha_P = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{P_i} l_i}{\gamma_9 \Delta U_{\text{доп}} U_{\text{ном}}}, \quad (17.66)$$

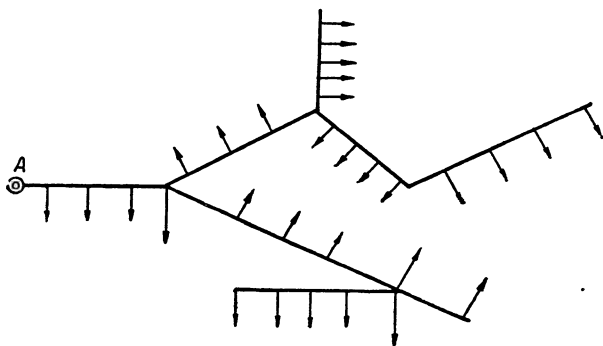
где P_i — мощности, протекающие в отдельных участках линии.

Расчет радиальных разветвленных сетей

Радиальные разветвленные сети отличаются от простых радиальных сетей тем, что в них имеется ряд разветвлений, в которых ток расходится к различным группам потребителей.

На фиг. 17.11 изображена схема радиальной разветвленной сети.

В подавляющем большинстве случаев при расчете разветвленных радиальных самолетных электрических сетей задача сводится к определению потери напряжения для наиболее удаленных потребителей при заданном сечении провода.



Фиг. 17.11. Принципиальная схема радиальной разветвленной сети.

Сечение проводов задается обычно на основании допустимых тепловых нагрузок для них или по соображениям механической прочности.

Если для разветвленной радиальной сети, изображенной на фиг. 17.12, требуется определить потери напряжения для потребителей в точках C и D , то решение задачи в этом случае сводится к простому суммированию потерь напряжения на отдельных участках:

для точки C

$$\Delta U_C = (I_{1н} + I_{2н}) \frac{l_{AB}}{\gamma_{э} S_1} + I_{1н} \frac{l_{BC}}{\gamma_{э} S_2}; \quad (17.67)$$

для точки D

$$\Delta U_D = (I_{1н} + I_{2н}) \frac{l_{AB}}{\gamma_{э} S_1} + I_{2н} \frac{l_{BD}}{\gamma_{э} S_3}. \quad (17.68)$$

После этого производят проверку:

$$\Delta U_C \leq \Delta U_{C \text{ доп}};$$

$$\Delta U_D \leq \Delta U_{D \text{ доп}}.$$

Фиг. 17.12. Линия, имеющая одно разветвление.

Задача сильно усложняется, если необходимо по заданной допустимой величине потери напряжения определить сечения участков сети. При такой постановке задачи решений может быть очень много, так как допустимую потерю напряжения $\Delta U_{\text{доп}}$ можно самым различным образом распределить между потерей напряжения в неразветвленном проводе AB и потерей напряжения в ответвлениях. Определенность задача получит, если поставить еще одно условие, например, условие минимального расхода проводникового материала или минимального полетного веса самолетной электрической сети (см. § 17.7).

Ниже рассматривается решение задачи при условии минимального расхода проводникового материала. Пусть заданная потеря напряжения разделена на две части следующим образом:

$$\Delta U_{\text{доп}} = \Delta U_0 + \Delta U_{\text{отв}}, \quad (17.69)$$

где ΔU_0 — потеря напряжения в неразветвленном проводе;

$\Delta U_{\text{отв}}$ — потеря напряжения в ответвлениях.

При этом предполагается, что потери напряжения во всех ответвлениях равны между собой.

Сечение неразветвленного провода

$$s_1 = \frac{\sum_{i=1}^n I_i l_i}{\gamma_9 \Delta U_0} = \frac{(I_{1н} + I_{2н}) l_{AB}}{\gamma_9 \Delta U_0}; \quad (17.70)$$

сечение провода ответвления BC

$$s_2 = \frac{I_{1н} l_{BC}}{\gamma_9 (\Delta U_{доп} - \Delta U_0)}; \quad (17.71)$$

сечение провода ответвления BD

$$s_3 = \frac{I_{2н} l_{BD}}{\gamma_9 (\Delta U_{доп} - \Delta U_0)}. \quad (17.72)$$

Объем всех проводов

$$V = \frac{1}{\gamma_9} \left[\frac{(I_{1н} + I_{2н}) l_{AB}^2}{\Delta U_0} + \frac{I_{1н} l_{BC}^2}{\Delta U_{доп} - \Delta U_0} + \frac{I_{2н} l_{BD}^2}{\Delta U_{доп} - \Delta U_0} \right]. \quad (17.73)$$

Условие минимума

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial \Delta U_0} = 0 = \frac{1}{\gamma_9} \left[-\frac{(I_{1н} + I_{2н}) l_{AB}^2}{\Delta U_0^2} + \frac{I_{1н} l_{BC}^2}{(\Delta U_{доп} - \Delta U_0)^2} + \right. \\ \left. + \frac{I_{2н} l_{BD}^2}{(\Delta U_{доп} - \Delta U_0)^2} \right], \end{aligned} \quad (17.74)$$

откуда

$$\begin{aligned} \frac{(\Delta U_{доп} - \Delta U_0)^2}{\Delta U_0^2} &= \frac{I_{1н} l_{BC}^2 + I_{2н} l_{BD}^2}{(I_{1н} + I_{2н}) l_{AB}^2}, \\ \Delta U_0 &= \frac{\Delta U_{доп}}{1 + \sqrt{\frac{I_{1н} l_{BC}^2 + I_{2н} l_{BD}^2}{(I_{1н} + I_{2н}) l_{AB}^2}}}. \end{aligned} \quad (17.75)$$

По найденному значению ΔU_0 нетрудно найти сечения проводов s_1 , s_2 и s_3 , соответствующие минимальному расходу проводникового материала.

§ 17.7. ЭКСПЛУАТАЦИОННО ВЫГОДНАЯ ПЛОТНОСТЬ ТОКА И ПОТЕРЯ НАПРЯЖЕНИЯ

В предыдущем параграфе указывалось, что задача расчета разветвленной самолетной электрической сети при заданной общей потере напряжения является неопределенной, так как общую потерю напряжения можно самым различным образом распределить по отдельным участкам сети. Необходимо наложить еще одно условие, например, условие минимального расхода проводникового материала, как это и было сделано в предыдущем параграфе.

Для наземных электрических сетей часто в качестве дополнительного требования ставится требование минимальной стоимости эксплуатационных расходов, в которые входит стоимость сооружения линий и ее эксплуатации и стоимость потерь. Плотность тока в проводах, отвечаю-

шая требованию минимума эксплуатационных расходов, называется экономической плотностью тока.

Для самолетных электрических сетей наиболее существенным является не стоимость эксплуатационных расходов на сеть, а ее полетный вес. Под полетным весом электрической сети подразумевается вес проводов сети и части источников энергии, зависящей от мощности потерь в электрической сети. В качестве дополнительного требования при расчетах разветвленных самолетных электрических сетей целесообразно ставить требования минимального полетного веса сети, как это предложено М. Я. Николаевским, Д. А. Поповым и др.

В полетный вес самолетной электрической сети входят вес проводов сети, дополнительный вес источников питания, обусловленный потерями энергии в сети, и вес топлива и смазки, расходуемых авиадвигателем на покрытие потери энергии в сети.

Для упрощения расчетов на минимальный полетный вес целесообразно ввести понятие о приведенном сечении электрической сети и приведенном токе нагрузки. Приведенным сечением самолетной электрической сети называется сечение провода линии, длина которой равна сумме длин всех участков сети и вес которой равен весу всех проводов электрической сети, т. е.

$$s_1 l_1 + s_2 l_2 + s_3 l_3 + \dots + s_n l_n = s (l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n),$$

где s — приведенное сечение сети;

s_i и l_i — сечение и длина i -того участка сети.

Таким образом, приведенное сечение сети равно

$$s = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} s_i l_i}{\sum_{i=1}^{i=n} l_i}. \quad (17.76)$$

Приведенным током нагрузки называется такой ток, который вызывает в сети, приведенной к одной линии сечением s , те же потери, которые имеются во всей сети, т. е.

$$I^2 \rho \frac{(l_1 + l_2 + \dots + l_n)}{s} = I_1^2 \rho \frac{l_1}{s_1} + I_2^2 \rho \frac{l_2}{s_2} + \dots + I_n^2 \rho \frac{l_n}{s_n},$$

где I — приведенный ток нагрузки.

Отсюда приведенный ток нагрузки равен

$$I = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} I_i^2 \frac{l_i}{s_i}}{s \frac{\sum_{i=1}^{i=n} l_i}{s_i}}}. \quad (17.77)$$

Вес приведенной электрической сети $G_{пр}$ пропорционален приведенному сечению s .

$$G_{пр} = \gamma s \sum_{i=1}^{i=n} l_i \text{ кг}, \quad (17.78)$$

где γ — удельный вес провода.

Дополнительное увеличение веса источников питания ΔG_n , вызванное необходимостью покрытия потерь энергии в сети, пропорционально потерям энергии в сети ΔP_c :

$$\Delta G_n = g_r \Delta P_c + 1,36 g_0 \cdot 10^{-3} \frac{\Delta P_c}{\gamma_r} = k_n \Delta P_c, \quad (17.79)$$

где g_r — вес генератора на единицу мощности в кг/вт;
 g_0 — вес первичного двигателя на единицу мощности в кг/л. с.;
 ΔP_c — потери энергии в сети в вт;
 η_r — коэффициент полезного действия генератора.

Вес топлива и смазки, расходуемых авиадвигателем на покрытие потерь в сети, пропорционален потерям в сети и времени полета (времени потерь) τ :

$$\Delta G_r = 1,36 \cdot 10^{-3} g_r \frac{\Delta P_c}{\eta_r} \tau = k_r \Delta P_c \tau, \quad (17.80)$$

где g_r — расход топлива и смазки в кг/л. с. час;

$$k_r = 1,36 \cdot 10^{-3} \frac{g_r}{\eta_r}.$$

Таким образом, зависящая от сечения проводов часть веса самолета равна

$$G_c = \gamma s \sum_{i=1}^{i=n} l_i + (k_n + k_r \tau) \Delta P_c. \quad (17.81)$$

Потеря мощности в сети зависит от сечения s и приведенной длины:

$$\Delta P_c = I^2 R = \frac{I^2 \rho \sum_{i=1}^{i=n} l_i}{s} = \rho \frac{I^2}{s} \sum_{i=1}^{i=n} l_i \text{ кмт.} \quad (17.82)$$

Подставляя найденное выражение для ΔP_c в (17.81),

$$G_c = \gamma s \sum_{i=1}^{i=n} l_i + (k_n + k_r \tau) \rho \frac{I^2}{s} \sum_{i=1}^{i=n} l_i. \quad (17.83)$$

Для определения минимума полетного веса сети дифференцируют последнее выражение по s и приравнивают результат нулю

$$\frac{dG_c}{ds} = \gamma \sum_{i=1}^{i=n} l_i - (k_n + k_r \tau) \rho \frac{I^2}{s^2} \sum_{i=1}^{i=n} l_i = 0. \quad (17.84)$$

Нетрудно убедиться, что это является условием минимума, так как

$$\frac{d^2 G_c}{ds^2} > 0.$$

Из (17.84) получают

$$\frac{I^2}{s^2} = j_s^2 = \frac{\gamma}{\rho (k_n + k_r \tau)}$$

или

$$j_s = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho (k_n + k_r \tau)}}. \quad (17.85)$$

Величина j_s представляет собой эксплуатационно выгодную плотность тока, при которой имеет место минимальный полетный вес сети. Следует иметь в виду, что эта эксплуатационно выгодная плотность тока должна быть, конечно, меньше допустимой плотности тока, в противном случае получить минимум полетного веса не представляется возможным.

Как видно, эксплуатационная плотность тока не зависит ни от приведенного сечения сети s , ни от ее длины.

Аналогичным образом можно ввести понятие о эксплуатационно выгодной потере напряжения. Для этого в выражении (17.81) s и ΔP_c необходимо выразить через потерю напряжения в сети.

Очевидно, что для приведенной сети

$$s = \frac{I \sum_{i=1}^{i=n} l_i}{\gamma_3 \Delta U_c} \text{ [мм}^2\text{]}, \quad (17.86)$$

$$\Delta P_c = I \Delta U_c \text{ [вт]}, \quad (17.87)$$

где ΔU_c — потери напряжения в сети.

Подставляя найденные выражения для s и ΔP_c в (17.81), получают

$$G_c = \gamma \frac{I \left(\sum_{i=1}^{i=n} l_i \right)^2}{\gamma_3} \frac{1}{\Delta U_c} + (k_n + k_T \tau) I \Delta U_c. \quad (17.88)$$

Величина ΔU_c , соответствующая минимуму последнего выражения, равна

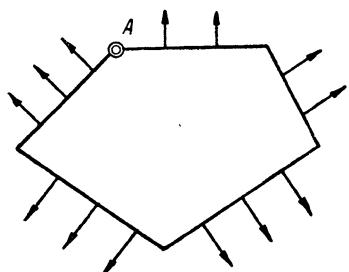
$$\Delta U_{c.з} = \sum_{i=1}^{i=n} l_i \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_3 (k_n + k_T \tau)}}. \quad (17.89)$$

Найденная эксплуатационно выгодная потеря напряжения должна быть меньше или равна допустимой величине потери напряжения, в противном случае выбирать эксплуатационно выгодную потерю напряжения нельзя.

§ 17.8. РАСЧЕТ ЗАМКНУТЫХ САМОЛЕТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ПОТЕРЮ НАПРЯЖЕНИЯ

Расчет простых замкнутых сетей

В замкнутых электрических сетях часть потребителей питается с одной стороны, т. е. от какого-либо одного источника питания. Некоторые же потребители получают электрическую энергию с разных сторон, т. е. от разных источников электроэнергии.



Фиг. 17.13. Замкнутая электрическая сеть с одним источником питания.

Точки замкнутой электрической сети, питаемые одновременно с двух сторон, называются точками токораздела и обозначаются знаком ∇ .

Точки электрической сети, которые могут питаться с трех и большего числа сторон, называются узловыми точками.

Простыми замкнутыми сетями называются такие, в которых отсутствуют узловые точки. Отсутствие узловых точек в сети даже при самой сложной ее конфигурации позволяет сравнительно просто найти токораспределение в сети. К простым замкнутым сетям относятся кольцевые сети. Кольцевая замкнутая электрическая сеть с одним источником питания, изображенная на фиг. 17.13, может быть представлена как электрическая сеть с двумя источниками питания, если ее разрезать по питательному пункту (фиг. 17.14).

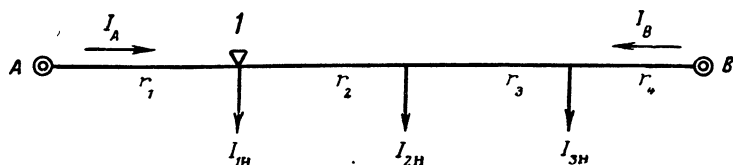
Расчет на потерю напряжения замкнутых сетей несколько сложнее расчета на потерю напряжения радиальных сетей, так как перед непо-

средственным расчетом сети на потерю напряжения необходимо найти распределение токов в сети и точки токораздела, а затем уже, разрезав замкнутую сеть в точках токораздела, производить расчет на потерю напряжения так же, как это делают для радиальных сетей.

Линия с двухсторонним питанием наиболее типична для простых замкнутых электрических сетей, поэтому расчет замкнутых электрических сетей на потерю напряжения целесообразно начать с расчета линии с двухсторонним питанием.

Линия с двухсторонним питанием

На фиг. 17.14 изображена линия с двухсторонним питанием и несколькими сосредоточенными нагрузками. Для общности выводов предполагается, что напряжения питательных пунктов не равны друг другу ($U_A \neq U_B$).



Фиг. 17.14. Линия с двухсторонним питанием.

Необходимо определить наибольшую потерю напряжения в линии. Очевидно, что наибольшая потеря напряжения будет иметь место до точки токораздела. Поэтому прежде всего необходимо найти точку токораздела. Для этого задаются направлением токов в линии и принимают токораздел в точке I . Если направление токов выбрано неверно, то в конце расчета эти токи будут иметь обратный знак. Нанеся действительное направление токов, после их определения автоматически находят действительную точку токораздела.

Ход решения этой задачи следующий.

Обозначив напряжение в точке токораздела через U , имеют

$$U = U_A - I_A r_1 = U_B - I_B r_4 - (I_B - I_{3н}) r_3 - (I_B - I_{3н} - I_{2н}) r_2; \quad (17.90)$$

с другой стороны,

$$I_A + I_B = I_{1н} + I_{2н} + I_{3н}. \quad (17.91)$$

Из последних двух уравнений можно найти I_A и I_B :

$$I_A = \frac{U_A - U_B}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4} + \frac{I_{1н}(r_2 + r_3 + r_4) + I_{2н}(r_3 + r_4) + I_{3н}r_4}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}, \quad (17.92)$$

$$I_B = \frac{U_B - U_A}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4} + \frac{I_{1н}r_1 + I_{2н}(r_1 + r_2) + I_{3н}(r_1 + r_2 + r_3)}{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}. \quad (17.93)$$

Если напряжения U_A и U_B , сечения проводов и длины участков линии между нагрузками заданы, то, определив токи I_A и I_B , можно найти действительное токораспределение и действительную точку токораздела.

Первое слагаемое выражения для токов I_A и I_B представляет собой уравнивающий ток в линии, обусловленный неравенством напряжений U_A и U_B . При равенстве напряжений источников питания уравнивающий ток отсутствует.

Если сечения проводов неизвестны, то задача по нахождению токораспределения в линии становится неопределенной потому, что для

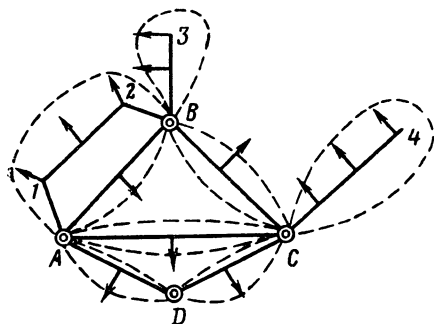
нахождения точки токораздела и величины токов в отдельных участках сети необходимо знать величину сопротивлений всех участков сети, которые также неизвестны. Задача эта становится определенной, если напряжения источников питания равны между собой и известно соотношение между сопротивлениями отдельных участков линии.

Обычно линия между двумя источниками выполняется проводом одного сечения. Если известны длины участков линии между нагрузками и напряжения источников питания равны ($U_A = U_B$), то выражения для токов I_A и I_B принимают вид

$$I_A = \frac{I_{1н}(l_2 + l_3 + l_4) + I_{2н}(l_3 + l_4) + I_{3н}l_4}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4}, \quad (17.94)$$

$$I_B = \frac{I_{1н}' + I_{2н}(l_1 + l_2) + I_{3н}(l_1 + l_2 + l_3)}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4}. \quad (17.95)$$

После того как точка токораздела найдена, линия разрезается по этой точке токораздела и производится расчет одной из ее сторон, так же как расчет простых радиальных линий.



Фиг. 17.15. Простая замкнутая сеть.

Линия с двухсторонним питанием является очень распространенной на самолетах.

Простая замкнутая электрическая сеть благодаря отсутствию узловых точек может быть приведена к ряду самостоятельных участков, представляющих собой линии с ответвлениями, питаемые с одной или двух сторон. Определение токораспределения и расчет на потери напряжения такой сети при равенстве на-

пряжений источников питания не представляют труда. На фиг. 17.15 приведен пример простой замкнутой сети. На той же фигуре пунктиром эта сеть после разрезания в соответствующих питательных пунктах разбита на ряд участков, каждый из которых представляет собой линию с ответвлениями, питаемую с одной или двух сторон (участки $A12B$, AB , $B3$, BC , $C4$, CD , DA , CA).

При расчете замкнутых самолетных электрических сетей на потерю напряжения, кроме основного расчета для нормального (номинального) режима работы, необходимо производить также расчет и на наиболее вероятные аварийные режимы. Обычно наиболее неблагоприятным аварийным режимом является обрыв линии вблизи одного из источников питания. При этом расчет проводов должен производиться как на допустимые нагрузки, так и на потери напряжения, причем допустимые нагрузки и потери напряжения для аварийных режимов принимают большими, чем для нормального режима.

Выше указывалось, что при определении токораспределения в линии с двухсторонним питанием задача становится неопределенной, если неизвестны сечения проводов линии или если сечение проводов линии не одинаково по всей длине.

В большинстве случаев расчету сети на потери напряжения предшествует расчет сети по допустимым электрическим и механическим нагрузкам, в результате которого устанавливается сечение проводов. Расчет же проводов сети на потерю напряжения имеет поверочный характер. Задача может быть поставлена иначе — найти сечение прово-

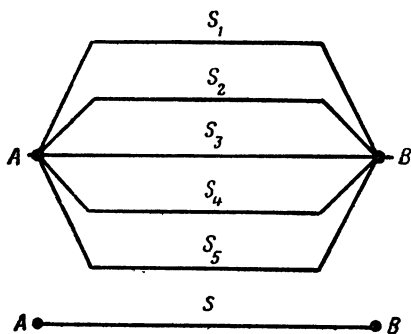
дов по допустимой потере напряжения, но для решения ее требуется задаться постоянным сечением проводов всей линии.

В практике в большинстве случаев кольцевые замкнутые сети или сети с двухсторонним питанием выполняются проводами одного сечения.

Методы преобразования сетей

При расчете замкнутых электрических сетей нахождение токораспределения в сети в ряде случаев представляет довольно трудоемкую задачу. При этом приходится пользоваться известными в электротехнике методами расчета электрических цепей (метод контурных токов, метод наложения, трансфигурация цепей и т. д.). Не останавливаясь на этих методах расчета, целесообразно, однако, осветить кратко некоторые специфические для расчета сетей элементарные методы преобразования сетей.

1) Замена нескольких параллельных линий одной эквивалентной. Если в сложной замкнутой сети имеется несколько параллельных линий при отсутствии на них нагрузок (фиг. 17.16), то эта линия может быть заменена одной эквивалентной, причем сопротивление этой эквивалентной линии определяется по известному правилу сложения параллельных сопротивлений:



Фиг. 17.16. Замена нескольких параллельных линий одной эквивалентной.

$$r_{\text{л}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i}}, \quad (17.96)$$

где n — число параллельных линий;

$r_{\text{л}}$ — сопротивление эквивалентной линии;

r_i — сопротивление i -той линии.

Если, например, $n=3$, то

$$r_{\text{л}} = \frac{r_1 r_2 r_3}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_3 r_1}.$$

Если заданы длина и сечения отдельных линий, то сечение эквивалентной линии той же длины равно сумме сечений отдельных линий (при условии, что все линии выполнены из одного материала и имеют одинаковую длину):

$$s = \sum_{i=1}^n s_i. \quad (17.97)$$

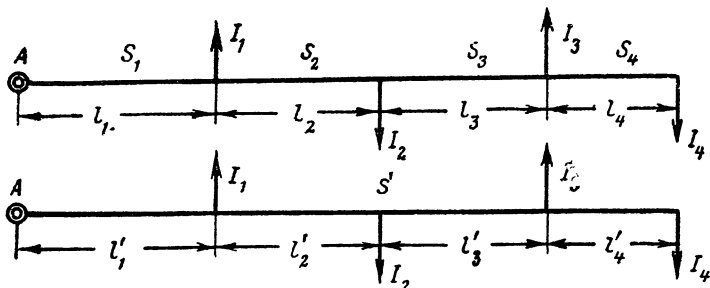
Зная общий ток I , протекающий по эквивалентной линии, нетрудно найти ток в каждой линии. Очевидно, что падение напряжения в i -той линии равно падению напряжения в эквивалентной линии:

$$r_i I_i = r_{\text{л}} I,$$

откуда

$$I_i = \frac{r_{\text{л}}}{r_i} I.$$

2) Замена отдельных участков линии с разными сечениями одной эквивалентной линией одного сечения. На фиг. 17.17 изображена линия, участки которой между отдельными нагрузками выполнены проводами разного сечения. Очевидно, что распределение нагрузок не нарушится, если при замене отдельных участков сети проводами одного сечения сопротивления участков проводов между нагрузками останутся теми же. При этом длины этих



Фиг. 17.17. Приведение линий к одному сечению.

участков должны измениться. Условие равенства сопротивлений действительного и преобразованного участков сети имеет вид

$$\rho \frac{l}{s} = \rho \frac{l'}{s'},$$

откуда

$$l' = l \frac{s'}{s}, \quad (17.98)$$

где l и s — действительные длина и сечение участка;

l' и s' — длина и сечение преобразованного участка.

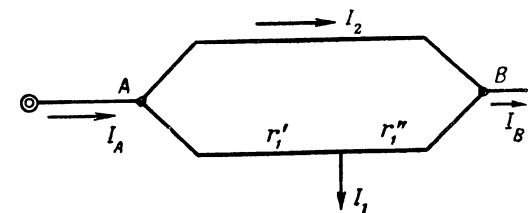
Зная l и s участка преобразуемой линии, по выражению (17.98) можно найти эквивалентную длину участка линии, приведенного к заданному сечению s' .

3) Разнос нагрузок в другие точки сети. В некоторых случаях, например, для замены ряда параллельных линий одной эквивалентной, приходится осуществлять разнос нагрузки, приложенной в середине какой-либо линии, по краям этой линии.

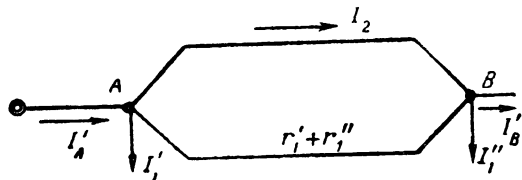
На фиг. 17.18 изображены две параллельные линии, причем в середине одной из линий имеется нагрузка. Требуется разнести нагрузку I_1 в точки A и B , т. е. заменить эту схему эквивалентной схемой, изображенной на фиг. 17.19.

При разнесе нагрузки I_1 в точки A и B , для того чтобы не нарушилось токораспределение, требуется, чтобы падение напряжения на участке AB — U_{AB} осталось тем же самым и токи I_A и I_B были равны токам I'_A и I'_B . Для схемы (см. фиг. 17.18) можно написать

$$(I_A - I_2) r'_1 + (I_A - I_1 - I_2) r''_1 = U_{AB}$$



Фиг. 17.18. Линия, нагруженная на одном из параллельных участков.



Фиг. 17.19. Линия, эквивалентная линии, изображенной на фиг. 17.18.

или

$$I_A(r'_1 + r''_1) = U_{AB} + I_2(r'_1 + r'_1) + I_1 r'_1. \quad (17.99)$$

Аналогично для схемы (см. фиг. 17.19)

$$(I'_A - I_2 - I_1)(r'_1 + r''_1) = U_{AB}$$

или

$$I'_A(r'_1 + r''_1) = U_{AB} + I_2(r'_1 + r'_1) + I'_1(r'_1 + r'_1). \quad (17.100)$$

Учитывая, что $I_A = I'_A$, из выражений (17.99) и (17.100) получают

$$I'_1 = \frac{r''_1}{r'_1 + r''_1} I_1; \quad (17.101)$$

$$I''_1 = I_1 - I'_1 = \frac{r'_1}{r'_1 + r''_1} I_1. \quad (17.102)$$

Таким образом, для того чтобы разнести нагрузку по концам линии, необходимо умножить величину этой нагрузки на сопротивление участка линии, противоположного тому концу линии, к которому приводится нагрузка, и разделить на полное сопротивление линии.

Расчет сложных замкнутых самолетных электрических сетей

Расчет сложных замкнутых самолетных электрических сетей представляет значительно более трудную задачу, чем расчет разомкнутых и простых замкнутых сетей, из-за тех трудностей, которые возникают при нахождении распределения токов по отдельным участкам замкнутой питательной электрической сети. Для нахождения токораспределения необходимо знать сопротивления отдельных участков питательной электрической сети, т. е. их сечения, которые неизвестны, так как их определение является конечной целью расчета сети.

Поэтому задача расчета сложных замкнутых электрических сетей в общем случае является неопределенной. При расчетах сложных замкнутых электрических сетей приходится прибегать к методу последовательных приближений, т. е. сначала предварительно задаться сечениями отдельных участков питательной электрической сети и произвести расчет токораспределения. Затем на основании найденного токораспределения исходя из допустимых потерь напряжения определить сечения проводов этой сети.

Если найденные таким образом сечения проводов близки к тем сечениям, которые были предварительно выбраны, то на этом расчет заканчивается, если же имеется расхождение между сечениями проводов, которые были предварительно выбраны, и сечениями проводов, найденными из расчета, то необходимо задаться новыми сечениями проводов и произвести весь расчет снова.

Специфической особенностью самолетных энергетических систем, содержащих несколько параллельно работающих генераторов, является наличие уравнивательных обмоток у регуляторов напряжения, которые служат для выравнивания нагрузки между параллельно работающими генераторами. Если самолетные генераторы работают на общие сборные шины, то нахождение токораспределения в сети при заданных сечениях проводов не составляет большого труда. Для этого достаточно разрезать сеть у сборных шин и рассчитывать отдельные участки сети как линии, питаемые с двух сторон при одинаковых напряжениях источников питания. При этом нагрузка расположена относительно всех генераторов

симметрично и они отдают (при одинаковых настройках регуляторов напряжения и равенстве сопротивлений в плюсовых и минусовых цепях генераторов) в сеть одинаковые токи:

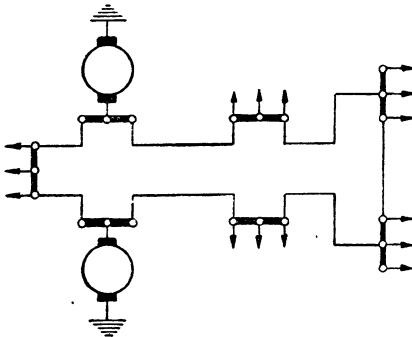
$$I_{r1} = I_{r2} = \dots = I_{rn} = \frac{I_n}{n},$$

где n — число генераторов;

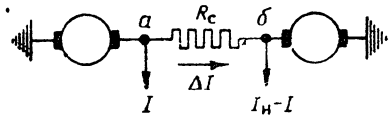
I_n — общий ток нагрузки в сети.

В случае когда самолетная электрическая сеть питается от нескольких генераторов, которые работают не на одни и те же сборные шины, учет действия уравнильных обмоток несколько осложняется. Генераторы будут отдавать одинаковые токи в сеть при равенстве минусовых сопротивлений и одинаковой настройке всех регуляторов напряжения лишь в том случае, если нагрузка в сети расположена симметрично относительно всех генераторов.

Если же нагрузка расположена относительно генераторов несимметрично (что часто встречается на практике, особенно при аварийных режимах), то равенства токов, отдаваемых отдельными генераторами, не будет.



Фиг. 17.20. Замкнутая самолетная электрическая сеть с двумя источниками питания, работающими на раздельные шины.



Фиг. 17.21. Принципиальная схема сети, изображенной на фиг. 17.20, после приведения.

Для правильного нахождения токораспределения в этом случае необходимо учитывать действие уравнильных обмоток регуляторов напряжения¹.

Ниже рассматривается, как это можно сделать применительно к замкнутой самолетной электрической сети, питаемой от двух генераторов (фиг. 17.20).

Пусть сечения всех проводов, а следовательно, и их сопротивления заданы. Изображенную на фиг. 17.20 замкнутую электрическую сеть можно посредством разнесения нагрузок к зажимам генераторов привести к виду, изображенному на фиг. 17.21.

Здесь I_n — общий ток нагрузки;

I — эквивалентная нагрузка в точке a после разнесения нагрузок;

R_c — расчетное сопротивление сети, полученное после разнесения нагрузок и объединения всех параллельных линий в одну.

В свою очередь самолетную электрическую сеть, схематически изображенную на фиг. 17.21, в развернутом виде можно представить так, как это изображено на фиг. 17.22.

На фиг. 17.22 w_z — обмотка электромагнита регулятора напряжения;

w_y — уравнильная обмотка;

R_6 — балластное сопротивление в минусовой цепи генератора.

¹ Учет действия уравнильных обмоток при расчете самолетной сети предложен М. А. Басовым.

При астатической настройке регуляторов можно написать

$$U_1 = U_{н.р} - \alpha i_y, \quad (17.103)$$

$$U_2 = U_{н.р} + \alpha i_y, \quad (17.104)$$

где $U_{н.р}$ — напряжение настройки регуляторов:

$$\alpha = r_y \frac{w_y}{w_\vartheta},$$

а r_y — сопротивление обмотки электромагнита.

Вычитая (17.104) из (17.103), получают

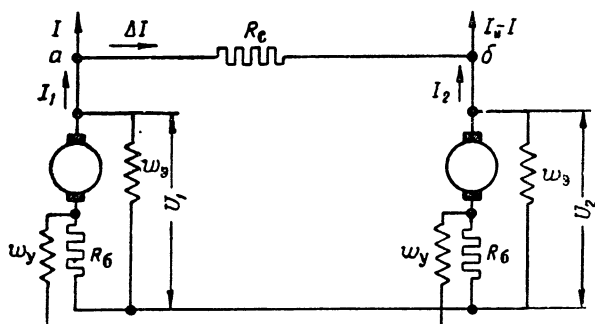
$$U_1 - U_2 = \Delta U = 2\alpha i_y. \quad (17.105)$$

Для контура уравнительных обмоток можно написать

$$(I_1 - i_y)R_\phi - (I_2 + i_y)R_\phi = 2i_y R_y, \quad (17.106)$$

где R_y — сопротивление уравнительной обмотки. Отсюда

$$i_y = \frac{(I_1 - I_2) R_\phi}{2(R_y + R_\phi)}. \quad (17.107)$$



Фиг. 17.22. Принципиальная схема приведенной самолетной электрической сети, изображенной на фиг. 17.20, с регуляторами напряжения и уравнительными цепями.

Как известно, полуразность токов генераторов называется поперечным током I_q :

$$I_q = \frac{I_1 - I_2}{2}.$$

Поэтому выражение (17.107) можно представить так:

$$i_y = I_q \frac{R_\phi}{R_y + R_\phi}. \quad (17.108)$$

Подставляя последнее выражение в (17.105), имеют

$$\Delta U = I_q 2 \frac{\alpha R_\phi}{R_y + R_\phi} = 2I_q R_\Gamma^*, \quad (17.109)$$

где $R_\Gamma^* = \alpha \frac{R_\phi}{R_y + R_\phi}$ — эквивалентное сопротивление генератора поперечному току.

С другой стороны, разность напряжений ΔU равна

$$\Delta U = \Delta I R_c, \quad (17.110)$$

где ΔI — приведенный ток через сопротивление R_c .

Приведенный ток в сопротивлении сети ΔI может быть представлен как разность поперечного тока генераторов при выключенной уравнивающей цепи I_{q0} и поперечного тока генераторов при включенной уравнивающей цепи I_q .

В самом деле, при выключенной уравнивающей цепи напряжения генераторов равны ($U_{10}=U_{20}=U_{н.р.}$) и никакого тока через сопротивление R_c не протекает. Поэтому для точки a можно написать

$$I = I_{q0} + \frac{I_n}{2} = I_{10}, \quad (17.111)$$

где I_{10} — ток первого генератора при выключенной уравнивающей цепи.

Значения разнесенной между точками a и b (фиг. 17.21) нагрузки практически не зависят от того, включена уравнивающая цепь или нет, поэтому при замкнутой уравнивающей цепи для точки a имеют

$$I = I_q + \frac{I_n}{2} - \Delta I = I_1 - \Delta I. \quad (17.112)$$

Приравнявая (17.111) и (17.112), находят

$$\Delta I = I_{q0} - I_q. \quad (17.113)$$

Подставляя в (17.104), получают

$$\Delta U = (I_{q0} - I_q) R_c. \quad (17.114)$$

Приравнявая (17.109) и (17.114), находят поперечный ток генераторов

$$I_q = I_{q0} \frac{R_c}{R_c + 2R_r^*} \quad (17.115)$$

и разницу в напряжениях генераторов

$$\Delta U = I_{q0} \frac{2R_r^* R_c}{R_c + 2R_r^*}. \quad (17.116)$$

Величину поперечного тока генераторов при выключенной уравнивающей цепи легко найти из (17.111):

$$I_{q0} = I - \frac{I_n}{2}.$$

Зная поперечный ток генераторов I_q , можно найти токи генераторов:

$$I_1 = \frac{I_n}{2} + I_q,$$

$$I_2 = \frac{I_n}{2} - I_q$$

и путем последовательного разветвления преобразованной сети токи на отдельных участках питательной сети.

§ 17.9. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА САМОЛЕТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

При расчете проводов электрической сети самолета на переменном токе необходимо иметь в виду, что мощность, передаваемая по проводам от генераторов к потребителю, равна

$$P = UI \cos \varphi, \quad (17.117)$$

откуда величина тока I , протекающего по проводам, будет

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}. \quad (17.118)$$

Из последнего выражения видно, что при одних и тех же величинах передаваемой мощности и напряжения переменный ток в проводах в $\frac{1}{\cos \varphi}$ раз больше постоянного тока, т. е. расчет проводов электрической сети нужно вести не на активный, а на кажущийся ток. Следовательно, потери энергии в проводах при переменном токе при прочих равных условиях в отношении мощностей и напряжений больше, чем потери энергии в проводах при постоянном токе.

Выше указывалось, что провода электрической сети при переменном токе, кроме активного сопротивления, несколько большего омического, обладают и реактивным сопротивлением.

Благодаря тому, что частота переменного тока, применяемого на самолетах, в 8 раз больше частоты промышленного переменного тока, в ряде случаев реактивное сопротивление самолетных проводов оказывается соизмеримым с активным и должно учитываться при расчетах.

Согласно выражению (17.17) потерю напряжения приближенно можно выразить так:

$$\Delta U = I r_{\text{л}} \cos \varphi + I x_{\text{л}} \sin \varphi \quad (17.119)$$

или

$$\Delta U = I_{\text{а}} r_{\text{л}} + I_{\text{р}} x_{\text{л}}, \quad (17.120)$$

где $I_{\text{а}} = I \cos \varphi$ — активный ток;

$I_{\text{р}} = I \sin \varphi$ — реактивный ток;

$r_{\text{л}}$ и $x_{\text{л}}$ — активное и реактивное сопротивления линии.

Если реактивным сопротивлением проводов пренебречь, то потерю напряжения с достаточным приближением можно определить по формуле

$$\Delta U = I_{\text{а}} r_{\text{л}}. \quad (17.121)$$

В этом случае величина потери напряжения определяется в основном величиной активного тока.

Величины потери мощности и падения напряжения в проводах, определяются как активным, так и реактивным токами (т. е. кажущимся током), независимо от того, можно или нельзя пренебречь реактивным сопротивлением проводов.

Для упрощения расчета проводов на потерю напряжения линий небольшой протяженности, к которым относятся и самолетные электрические сети, обычно делают допущение о том, что углы сдвига фаз отдельных нагрузок отсчитываются от одного и того же вектора напряжения в конце линии. Как правило, такое допущение не приводит к сильному расхождению с действительной картиной фазовых сдвигов токов и напряжений.

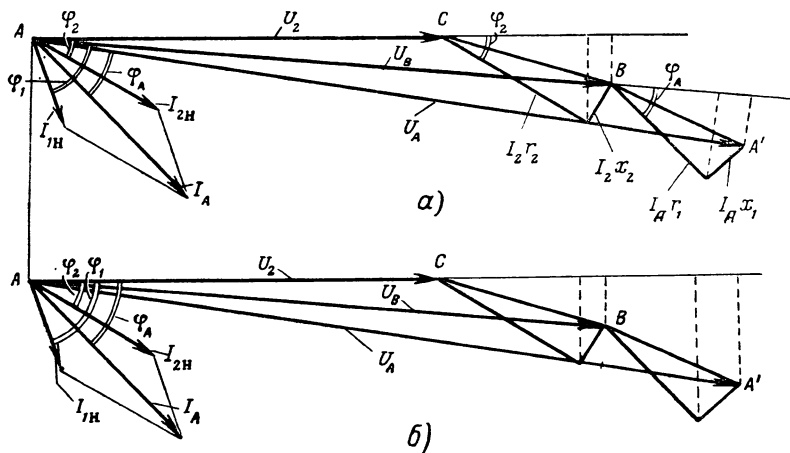
В качестве примера на фиг. 17.23,а приведена действительная, а на фиг. 17.23,б упрощенная векторные диаграммы для расчетной схемы линии переменного тока с двумя сосредоточенными нагрузками (фиг. 17.24).

Для построения векторной диаграммы по линии АС (фиг. 17.24,а) откладывают вектор напряжения в конце линии U_2 и под углом φ_2 к нему ток нагрузки $I_2 = I_{2\text{н}}$.

Для получения вектора напряжения в точке В к концу вектора U_2 прибавляют активное ($I_2 r_2$) и реактивное ($I_2 x_2$) падения напряжения на участке линии ВС. Вектор, соединяющий точку А с найденной таким образом точкой В, является напряжением в точке В линии U_B . Под

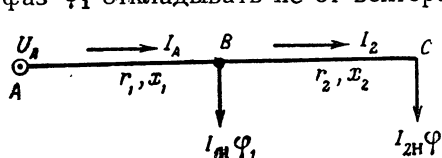
углом φ_1 к вектору напряжения откладывают ток нагрузки I_{1H} . Геометрическая сумма токов I_{1H} и I_{2H} дает ток I_A на участке линии AB .

Для получения вектора напряжения в начале линии к концу вектора U_B прибавляют активное и реактивное падения напряжения на участке линии AB . Вектор, соединяющий точку A с найденной точкой A' (фиг. 17.23,а), является напряжением в начале линии U_A , а угол φ_A — сдвигом фаз между током и напряжением в начале линии.



Фиг. 17.23. а — векторная диаграмма токов и напряжений для линии переменного тока с двумя сосредоточенными нагрузками; б — упрощенная векторная диаграмма токов и напряжений для линий переменного тока с двумя сосредоточенными нагрузками.

В самолетных электрических сетях переменного тока потери напряжения в линиях лежат в пределах (6—10%) от номинального напряжения сети, поэтому угол BAC очень мал. Это позволяет угол сдвига фаз φ_1 откладывать не от вектора U_B , а от вектора U_2 (фиг. 17.23,б).



Фиг. 17.24. Линия переменного тока с двумя сосредоточенными нагрузками.

Так, для векторной диаграммы, изображенной на фиг. 17.23,б, можно написать следующее выражение для общей потери напряжения:

$$\Delta U \approx I_2 r_2 \cos \varphi_2 + I_2 x_2 \sin \varphi_2 + I_A r_1 \cos \varphi_A + I_A x_1 \sin \varphi_A.$$

При расчете сети переменного тока необходимо, как и при расчете сетей постоянного тока, предварительно найти картину токораспределения в сети.

Если реактивным сопротивлением линий пренебрегают, то достаточно найти распределение активных токов; если же необходимо учесть и реактивное сопротивление линий, то следует найти картину токораспределения как для активных, так и для реактивных токов отдельно. Потерю напряжения в этом случае подсчитывают по формуле

$$\Delta U = \sum_{i=1}^n I_a i r_i + \sum_{i=1}^n I_p i x_i. \quad (17.122)$$

Векторы Oa ; Ob и Oc представляют собой фазовые напряжения, а векторы ab ; bc и ca — линейные напряжения в начале линии. Для определения напряжений в конце линии от векторов $U_{1ф}$; $U_{2ф}$; $U_{3ф}$ необходимо отнять активные ($I r_{л}$) и реактивные ($I x_{л}$) падения напряжений в линии. Тогда векторы Oa' , Ob' и Oc' представят собой фазовые, а векторы $a'b'$; $b'c'$ и $c'a'$ — линейные напряжения в конце линии.

Вектор aa' является падением напряжения в одном проводе линии. Приближенно можно написать

$$U'_{1ф} = U_{1ф} - I_1 r_{л} \cos \varphi - I_1 x_{л} \sin \varphi, \quad (17.123)$$

где $I_1 r_{л} \cos \varphi$ и $I_1 x_{л} \sin \varphi$ — проекции падения напряжения в линии на напряжение $U_{1ф}$.

Так как треугольник $a'b'c'$ равносторонний, то линейные напряжения в конце линии связаны с фазовыми соотношением $U'_{1л} = \sqrt{3} U'_{1ф}$. Подставляя выражение для $U'_{1ф}$, имеют

$$U'_{1л} = \sqrt{3} (U_{1ф} - I_1 r_{л} \cos \varphi - I_1 x_{л} \sin \varphi) = U_{1л} - \sqrt{3} I_1 (r_{л} \cos \varphi + x_{л} \sin \varphi). \quad (17.124)$$

Величина $I_1 (r_{л} \cos \varphi + x_{л} \sin \varphi)$ является потерей напряжения в одном проводе.

Таким образом, если в двухфазной цепи переменного тока общая потеря напряжения равна удвоенной потере напряжения в одном проводе, то в сети трехфазного тока при равномерной нагрузке она лишь в 1,73 раза больше потери напряжения в одном проводе. Это объясняется тем, что при равномерной нагрузке трех фаз ток в нулевом проводе отсутствует. При неравномерной нагрузке трехфазной сети в нулевом проводе будет протекать ток. Для расчета такой сети необходимо строить ее векторную диаграмму и находить ток в нулевом проводе.

В самолетных трехфазных сетях, где нулевым проводом служит корпус самолета, потерей напряжения в нулевом проводе можно пренебречь, что существенно упрощает расчет.

Глава XVIII

АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ В САМОЛЕТНЫХ СЕТЯХ И РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

§ 18.1. АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА САМОЛЕТЕ

В процессе эксплуатации электрооборудования самолета не исключена возможность повреждения тех или иных участков электрической сети самолета.

Наиболее часто встречающимися повреждениями самолетной электрической сети являются: обрыв провода, замыкание провода на массу, короткие замыкания, которые вызывают аварийные режимы в самолетной электрической сети. Аварийный режим самолетной электрической сети может привести к очень серьезным последствиям, вплоть до выхода из строя всей системы передачи и распределения электрической энергии, отказа в работе основного электрооборудования и даже к пожару, взрыву и т. д. Особенно велика вероятность повреждения электрической сети самолета в условиях боевых действий вследствие поражений самолета огнем противника.

Подавляющее большинство повреждений самолетной электрической сети, особенно если на самолете применяется однопроводная система, приводит к коротким замыканиям. Обрыв проводов электрической сети почти всегда сопровождается замыканием оголенной жилы на корпус самолета и, следовательно, коротким замыканием.

Опыт показывает, что короткое замыкание часто приводит к выгоранию металла в месте короткого замыкания и вследствие этого к самодеструкции короткого замыкания. В других случаях дуга, возникшая в месте короткого замыкания, может носить перемежающийся характер.

Причиной тяжелых последствий коротких замыканий на самолете может явиться неудовлетворительная работа аппаратов защиты самолетной электрической сети.

Ненормальные режимы в самолетных электрических системах могут возникнуть при выходе из строя одного или нескольких источников электрической энергии вследствие каких-либо повреждений. При этом может оказаться, что мощность остальных источников энергии будет недостаточной для питания всех потребителей, в результате чего напряжение в сети может сильно понизиться, иногда почти до нуля. При сильном понижении напряжения большинство электрических аппаратов, приборов и машин на самолете не может нормально работать, а некоторые из них (например, двигатели с параллельным возбуждением) начинают потреблять токи, намного превосходящие номинальные значения.

Аварийные режимы в самолетных электрических системах могут возникать также вследствие перегрузок. В перегруженном элементе

электрооборудования протекают токи, превосходящие допустимые для данного элемента значения.

При достаточной длительности протекания этих токов температура токоведущих частей превышает допустимую величину, что приводит к разрушению изоляции, коротким замыканиям и пожарам.

Таким образом, короткие замыкания, повреждения и ненормальные режимы работы приводят к возникновению в самолетных электрических системах аварий, под которыми в общем случае следует понимать всевозможные вынужденные нарушения нормального режима работы всей системы передачи и распределения электрической энергии на самолете или части ее, сопровождающиеся разрушением оборудования, ухудшением качества электрической энергии, пожаром и т. п.

Как указывалось выше, наиболее вероятным и тяжелым видом повреждения электрической сети являются короткие замыкания. С помощью защитной аппаратуры участок электрической сети самолета, на котором возникло короткое замыкание, должен быть быстро отключен, благодаря чему предотвращается развитие короткого замыкания в тяжелое повреждение. Чтобы правильно подобрать защитную и коммутационную аппаратуру, способную в случае повреждения или ненормального режима работы отключить поврежденный участок сети и при этом так, что неповрежденные участки сети будут оставаться в действии, необходимо знать токи и напряжения в отдельных участках электрической сети при соответствующем аварийном режиме. Знание возможной мощности короткого замыкания необходимо для определения разрывной мощности контактов коммутационной аппаратуры, которая должна отключать короткое замыкание. Только зная распределение вероятных токов короткого замыкания, можно проверить избирательность действия защитной аппаратуры. Знание величины токов короткого замыкания необходимо также для определения динамических усилий, воздействующих на шины распределительных устройств, а также для определения термического действия этих токов. Поэтому очень важно уметь находить величины токов наиболее вероятных коротких замыканий для правильного проектирования системы передачи и распределения электрической энергии на самолете.

§ 18.2. СОПРОТИВЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПРИ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ И ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

При внезапных коротких замыканиях на зажимах тех или иных элементов электрооборудования самолета возникает переходный неустановившийся процесс. Ток, протекающий через поврежденный элемент, меняется от первоначального, имевшего место перед коротким замыканием, номинального значения до значения установившегося тока короткого замыкания. В процессе этого изменения меняется и напряжение на зажимах элемента электрооборудования.

Отношение элементарного изменения напряжения на зажимах элемента электрооборудования к элементарному изменению тока, протекающего через него в процессе короткого замыкания в данный момент времени, называется переходным сопротивлением элемента электрооборудования.

В общем случае переходное сопротивление элемента электрооборудования является функцией как тока короткого замыкания, протекающего через него в данный момент времени, так и момента времени, для которого определяется это сопротивление.

Для режима установившегося короткого замыкания переходное сопротивление уже не зависит от времени. Сопротивление элемента электрооборудования для установившегося режима короткого замыкания называется сопротивлением установившегося короткого замыкания или просто сопротивлением короткого замыкания элемента электрооборудования.

В соответствии с понятиями переходного и установившегося сопротивлений элемента электрооборудования при коротких замыканиях вводятся понятия о вольтамперных характеристиках элементов электрооборудования в переходном и установившемся режимах короткого замыкания.

Вольтамперной характеристикой переходного режима элемента электрооборудования называется зависимость напряжения на зажимах этого элемента от тока, проходящего через этот элемент для данного момента времени.

Для получения этой вольтамперной характеристики необходимо произвести расчеты токов короткого замыкания при различных сопротивлениях короткозамкнутой цепи или снять экспериментальным путем серию осциллограмм тока короткого замыкания для различных сопротивлений цепи короткого замыкания.

На основании данных, полученных из расчетов или эксперимента, строится вольтамперная характеристика переходного режима для какого-то определенного момента времени.

В качестве первоначальных значений тока и напряжения берутся обычно ток и напряжение, соответствующие номинальному режиму работы, так как при этом режиме токи переходного короткого замыкания получаются наибольшими.

Для данного элемента электрооборудования можно построить очень много вольтамперных характеристик в переходном режиме, так как каждому моменту времени в общем случае соответствует своя вольтамперная характеристика в переходном режиме. Однако с практической точки зрения наибольший интерес представляют вольтамперные характеристики, соответствующие моменту времени, при котором достигается максимальное значение тока короткого замыкания. Поэтому в дальнейшем вольтамперной характеристикой элемента электрооборудования в переходном режиме называется зависимость между напряжением и током короткого замыкания для момента времени, соответствующего максимальной величине тока короткого замыкания.

Вольтамперной характеристикой установившегося режима короткого замыкания элемента электрооборудования называется зависимость напряжения на зажимах элемента электрооборудования от тока установившегося короткого замыкания.

Очевидно, что для генератора вольтамперной характеристикой установившегося режима является внешняя характеристика. Также легко понять, что вольтамперные характеристики установившегося режима являются частным случаем вольтамперных характеристик переходного режима, снятых для моментов времени $t = \infty$.

Следует иметь в виду, что для получения вольтамперных характеристик как для переходного, так и для установившегося режима необходимо эти характеристики строить в предположении, что сопротивление короткого замыкания меняется.

Ниже рассматриваются вольтамперные характеристики отдельных элементов электрооборудования самолета на постоянном токе.

Вольтамперные характеристики элементов электрооборудования следует разбить на две группы. К первой группе относятся вольтамперные

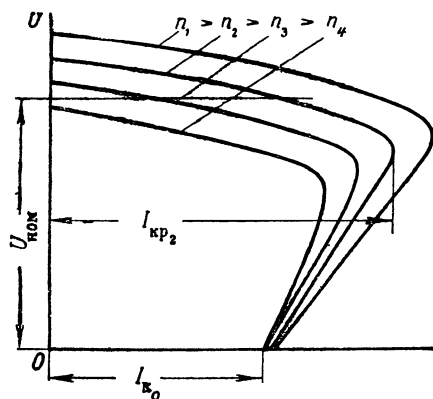
характеристики источников электрической энергии на самолете (генераторы, аккумуляторные батареи), ко второй группе — потребителей электрической энергии (двигатели, участки питательной сети, прочие потребители).

Такое разграничение вольтамперных характеристик является в некоторой степени условным, поскольку, как это будет видно из дальнейшего, в переходных режимах после внезапного короткого замыкания некоторые потребители превращаются в генераторы электрической энергии (например, двигатели параллельного возбуждения). Тем не менее такое разграничение вольтамперных характеристик представляет большие удобства при расчете токов короткого замыкания. В каждом конкретном случае легко установить, к какой категории удобнее отнести вольтамперные характеристики рассматриваемого элемента электрооборудования.

§ 18.3. ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

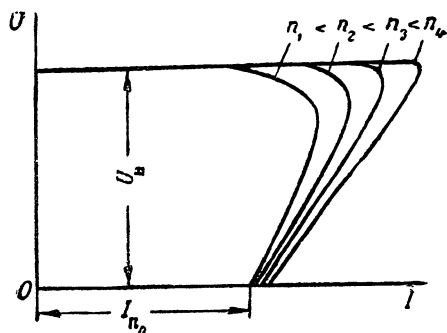
Вольтамперной характеристикой самолетного генератора постоянного тока в установившемся состоянии является внешняя характеристика генератора.

На фиг. 18.1 изображено семейство таких внешних характеристик для самолетного генератора постоянного тока с параллельным возбуждением при различных скоростях вращения генератора при отсутствии регулятора напряжения.



Фиг. 18.1. Семейство внешних характеристик самолетного генератора постоянного тока.

Если самолетный генератор работает с регулятором напряже-



Фиг. 18.2. Семейство внешних характеристик самолетного генератора постоянного тока при наличии регулятора напряжения.

ния, то его вольтамперные характеристики в установившемся режиме приобретают вид, изображенный на фиг. 18.2.

Величина установившегося тока короткого замыкания при нулевом сопротивлении внешней цепи генератора определяется величиной остаточного намагничивания машины, скоростью вращения и подмагничивающим эффектом тока короткого замыкания, который сказывается при наличии у генератора дополнительных полюсов и последовательных витков возбуждения. Из рассмотрения вольтамперных характеристик генератора в установившемся режиме можно сделать следующий вывод. Для наиболее часто встречающегося в практике случая оборудования самолетного генератора регулятором напряжения наибольшие величины установившихся токов короткого замыкания при сопротивлении коротко-

замкнутой цепи, отличным от нуля, получаются при максимальной скорости вращения генератора. Поэтому при расчете установившихся токов короткого замыкания в дальнейшем (в отличие от расчета переходных токов короткого замыкания) принимается, что перед коротким замыканием генератор вращается с максимальной скоростью.

Для построения вольтамперных характеристик генератора в переходном режиме необходимо иметь семейство кривых изменения тока короткого замыкания во времени при различных величинах сопротивления от шин генератора до места короткого замыкания. Если внезапное короткое замыкание происходит на шинах генератора, то это соответствует случаю короткого замыкания, рассмотренному в главе VIII. В остальных случаях ток короткого замыкания будет меньше за счет того, что сопротивление между шинами генератора и точкой короткого замыкания ограничивает его величину.

В дальнейшем рассматривается внезапное короткое замыкание генератора, которое происходит при полностью нагруженном генераторе и минимальной скорости его вращения, так как этот случай соответствует, как указано в главе VIII, наибольшей возможной величине переходного тока короткого замыкания.

Пусть характер изменения токов короткого замыкания во времени известен на основании экспериментальных данных или расчета. Семейство этих кривых изображено на фиг. 18.3.

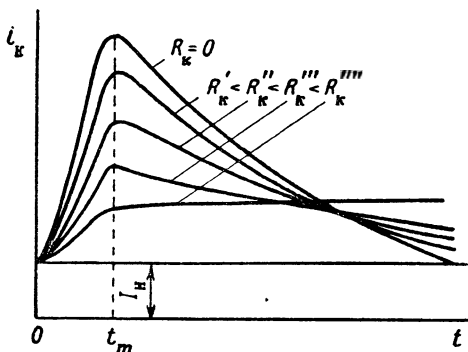
Кривая для $R_k=0$ (короткое замыкание на шинах) расположена выше всех остальных кривых. При $R_k=R_{\text{ном}}$ получается второй предельный случай, кривая изменения тока короткого замыкания вырождается в прямую, параллельную оси абсцисс и отстоящую от нее на величину $i=I_{\text{ном}}$. Разумеется, что данное семейство кривых должно быть построено для какой-то определенной скорости вращения генератора n .

Как видно, кривые зависимости переходного тока короткого замыкания от времени пересекаются между собой. Это говорит о том, что если максимальное значение переходного тока короткого замыкания увеличивается с уменьшением сопротивления короткого замыкания, то установившееся значение тока короткого замыкания, наоборот, уменьшается с уменьшением сопротивления короткого замыкания. Это объясняется тем, что режимы установившегося короткого замыкания соответствуют нижней части внешней характеристики генератора.

На основании этого семейства кривых может быть установлена зависимость напряжения на зажимах генератора U_k от тока якоря i_k для какого-то определенного момента времени t_1 , т. е. найдена вольтамперная характеристика генератора в переходном режиме, отнесенная ко времени t_1 при данной скорости вращения генератора n .

Величина U_k определяется как произведение $R_k i_k$.

С точки зрения величины токов короткого замыкания в переходных режимах наибольший интерес представляет тот момент времени, когда ток короткого замыкания достигает максимального значения. Поэтому

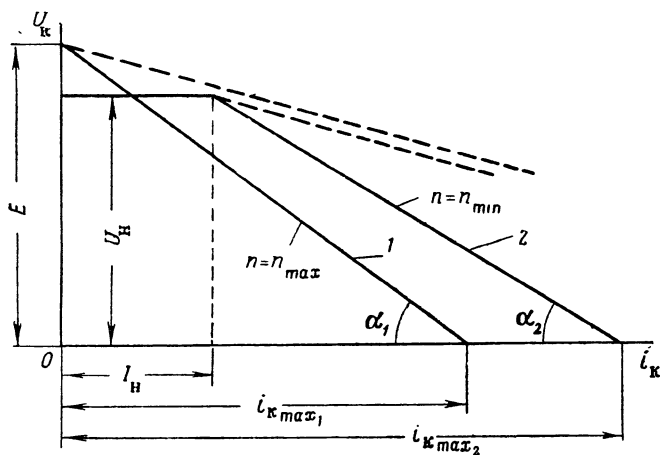


Фиг. 18.3. Семейство зависимостей тока короткого замыкания на зажимах самолетного генератора постоянного тока от времени.

вольтамперные характеристики самолетного генератора постоянного тока в переходных режимах относятся к моменту времени t_m , в который ток короткого замыкания достигает максимального значения. Таким образом, проведя через точку $t=t_m$ прямую, параллельную оси ординат (см. фиг. 18.3), можно построить вольтамперную характеристику генератора в переходном режиме на основании экспериментальных данных.

Опыт показывает, что если строить вольтамперные характеристики самолетных генераторов постоянного тока, используя экспериментальные кривые измерения тока генератора при внезапном коротком замыкании для различных сопротивлений до места короткого замыкания, то эти характеристики получаются почти прямолинейными.

Это обстоятельство облегчает построение вольтамперных характеристик генератора в переходном режиме, так как достаточно знать две точки вольтамперной характеристики, чтобы получить всю характеристику.



Фиг. 18.4. Вольтамперные характеристики самолетного генератора постоянного тока в переходном режиме.

Так, если короткому замыканию предшествовал режим холостого хода при $n=n_{\max}$, то при $R_k=0$ $U_k=0$ и ток короткого замыкания имеет максимальное значение $i_k=i_{k,\max 1}$. Величину максимального значения тока короткого замыкания можно рассчитать так, как указано в главе VIII, или найти из осциллограммы тока короткого замыкания на зажимах генератора.

Таким образом, одна точка вольтамперной характеристики, лежащая на оси абсцисс, известна. Вторая известная точка вольтамперной характеристики соответствует режиму работы генератора в момент времени, предшествующий короткому замыканию: $R_k=\infty$, $i_k=0$, $U=E$, где E — э. д. с. генератора.

На фиг. 18.4 эта вольтамперная характеристика изображена прямой 1. Если короткому замыканию предшествует режим номинальной нагрузки при $n=n_{\min}$, то при $R_k=0$ $U_k=0$ и ток короткого замыкания имеет максимальное значение $i_{k,\max 2}$, большее, как указывалось выше, максимальной величины тока при отсутствии предварительной нагрузки генератора.

Эта величина максимального тока короткого замыкания может быть рассчитана или найдена экспериментально. Вторая точка вольтамперной характеристики определяется из условий, предшествующих короткому за-

мыканию: $R=R_{\text{ном}}, i_{\text{к}}=i_{\text{ном}}, U=U_{\text{ном}}$. Характеристика, соответствующая этому случаю, изображена на фиг. 18.4 в виде прямой 2.

На той же фигуре пунктирной линией нанесены вольтамперные характеристики, которые получились бы в том случае, если бы э. д. с. якоря оставалась постоянной и равной начальной величине, что соответствует случаю независимого возбуждения, при котором снижение напряжения определялось бы лишь падением напряжения в сопротивлении якоря.

При практических расчетах вольтамперные характеристики генератора постоянного тока при переходном режиме представляют в виде прямых линий и формально считают, что якорь генератора обладает некоторым постоянным переходным сопротивлением, определяющим наклон вольтамперных характеристик на фиг. 18.4 (углы α_1 и α_2). При этом следует иметь в виду, что переходное сопротивление якоря генератора получается больше действительного сопротивления якоря, причем переходное сопротивление увеличивается с возрастанием скорости вращения.

Это обстоятельство указывает на тот факт, что кажущееся увеличение сопротивления якоря при переходном режиме есть результат уменьшения э. д. с. якоря, вызванного уменьшением полезного магнитного потока вследствие развозбуждения генератора.

К понятию переходного сопротивления генератора при коротком замыкании можно подойти и несколько иначе.

Для режима короткого замыкания можно написать

$$e_{\text{г}}(t) = U_{\text{к}} + i_{\text{к}} r_{\text{я}}, \quad (18.1)$$

где $e_{\text{г}}(t)$ — э. д. с. генератора, которая в процессе короткого замыкания уменьшается вследствие уменьшения магнитного потока.

В начальный момент короткого замыкания $e_{\text{г}}(t)$ имеет наибольшее значение, равное э. д. с. генератора E перед коротким замыканием. Поэтому можно написать

$$e_{\text{г}}(t) = E_{\text{г}} - \Delta e_{\text{г}}(t), \quad (18.2)$$

где $E_{\text{г}}$ — э. д. с. генератора перед коротким замыканием;

$\Delta e_{\text{г}}(t)$ — величина, характеризующая уменьшение э. д. с. генератора в процессе короткого замыкания.

Подставляя (18.2) в (18.1), получают

$$E_{\text{г}} - \Delta e(t) = U_{\text{к}} + i_{\text{к}} r_{\text{я}}. \quad (18.3)$$

Последнее уравнение можно переписать так:

$$E_{\text{г}} = U_{\text{к}} + i_{\text{к}} \left[r_{\text{я}} + \frac{\Delta e(t)}{i_{\text{к}}} \right]. \quad (18.4)$$

Величина

$$\left[r_{\text{я}} + \frac{\Delta e(t)}{i_{\text{к}}} \right] = \frac{E_{\text{г}} - U_{\text{к}}}{i_{\text{к}}} = r_{\text{г}}(t) \quad (18.5)$$

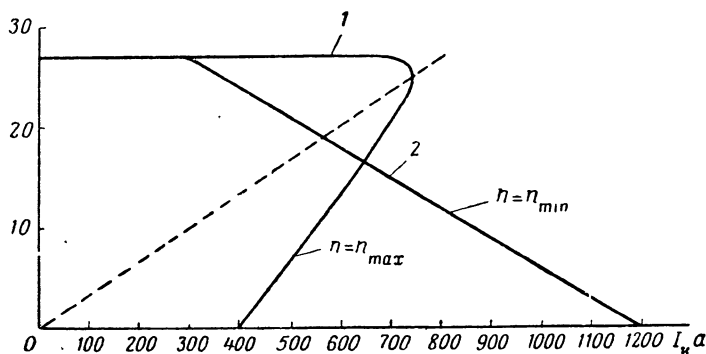
является сопротивлением генератора в переходном режиме. Из выражения (18.5) видно, что переходное сопротивление генератора больше его внутреннего сопротивления.

Если генератор снабжен регулятором напряжения, то все вольтамперные характеристики генератора в переходных режимах должны начинаться от прямой, параллельной оси абсцисс, на расстоянии $U_{\text{н}}$ от нее.

В действительности, как показывают теоретические выводы и экспериментальные исследования, переходные вольтамперные характеристики

не являются прямолинейными, а несколько отклоняются от прямых линий. Особенно заметно отклонение вольтамперной характеристики генератора в переходном режиме от прямой линии для того случая, когда режим короткого замыкания предшествует холостой ход при максимальной скорости вращения. Для того же случая, который представляет для расчета токов короткого замыкания наибольший интерес (предшествующий короткому замыканию режим — номинальная нагрузка при минимальной скорости вращения), отклонение действительной вольтамперной характеристики от прямой линии настолько незначительно, что им можно пренебрегать.

Выше отмечалось, что условно вольтамперные характеристики при переходном режиме относятся к моменту времени t_m , соответствующему максимуму тока короткого замыкания.



Фиг. 18 5. Вольтамперные характеристики самолетного генератора постоянного тока мощностью 9 квт, работающего с регулятором напряжения.

Экспериментальные исследования переходных процессов в самолетных генераторах постоянного тока показывают, что спустя примерно 0,1 сек. после внезапного изменения сопротивления внешней цепи генератора наступает установившийся режим.

На фиг. 18.5 приведены вольтамперные характеристики при установившемся и переходном режимах для авиационного генератора номинальной мощностью 9 квт, работающего с регулятором напряжения. Характеристика переходного режима построена для минимальной скорости вращения генератора, а характеристика установившегося режима — для максимальной скорости вращения.

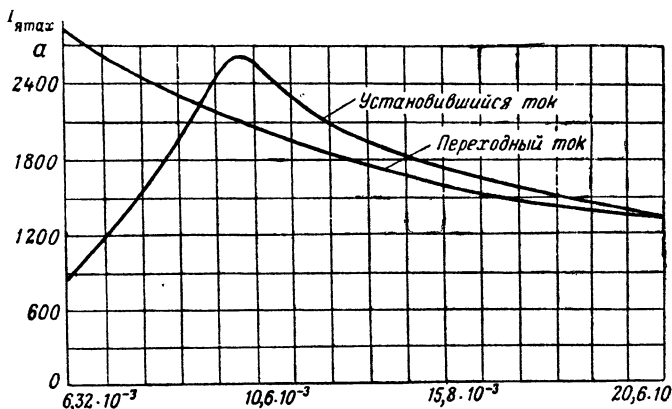
Как видно, при переходном режиме могут иметь место значительно большие токи якоря, чем при установившемся.

На фиг. 18.6 изображены кривые зависимости максимальной величины переходного тока короткого замыкания и установившегося тока короткого замыкания от сопротивления короткого замыкания для самолетного генератора постоянного тока мощностью 18 квт, работающего с регулятором напряжения. Кривые эти носят название кривых затухания переходного и установившегося токов короткого замыкания.

Сопротивление, соответствующее максимальному значению установившегося тока короткого замыкания, определяется углом наклона прямой, соединяющей начало координат с ординатой напряжения, соответствующего критическому току генератора (пунктирная линия на фиг. 18.5).

Помимо самолетных генераторов постоянного тока, являющихся основным источником электрической энергии на самолете, в качестве

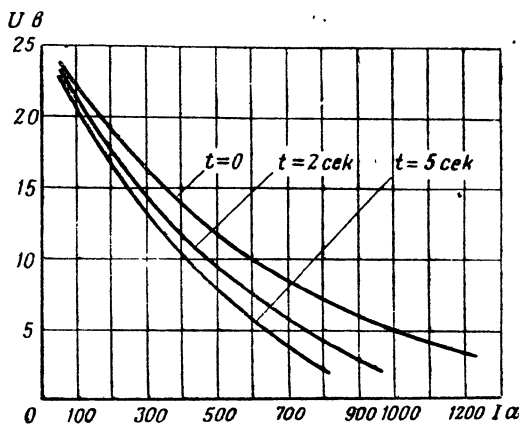
резервных источников электрической энергии применяются аккумуляторные батареи. Внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи является функцией многих факторов, как то: плотности и температуры электролита, степени заряженности батареи, предшествующего режима работы и т. д., и непрерывно меняется в процессе работы аккумулятора.



Фиг. 18.6. Кривые зависимостей максимального переходного тока и установившегося тока короткого замыкания от сопротивления короткого замыкания для генератора мощностью 18 квт.

В результате этого понятие установившегося тока короткого замыкания в полном смысле этого слова не может быть применено к аккумуляторной батарее, так как величина этого «установившегося» тока короткого замыкания при данной величине внешнего сопротивления будет непрерывно уменьшаться (ползти) по мере разряда аккумулятора. Поэтому величина этого «установившегося» тока короткого замыкания должна быть отнесена к какому-то моменту времени.

На фиг. 18.7 изображено семейство вольтамперных характеристик полностью заряженной кислотной аккумуляторной батареи для различных моментов времени после внезапного короткого замыкания.



Фиг. 18.7. Семейство вольтамперных характеристик аккумуляторной батареи.

Кривая $t=0$ соответствует моментам времени, непосредственно следующим за коротким замыканием, и поэтому располагается выше других кривых, соответствующих более поздним моментам времени.

С понижением температуры внутреннее сопротивление батареи возрастает, в связи с чем увеличивается и наклон вольтамперных характеристик. Подобным же образом влияет на характеристики и увеличение разряженности батареи.

Для аккумуляторной батареи понятие «установившийся» и «переходный» токи короткого замыкания совпадают, так как для тех небольших интервалов времени установления токов короткого замыкания, которые имеют место в самолетных генераторах, ток короткого замыкания

аккумуляторной батареи изменяется незначительно. Для расчета как установившихся, так и переходных токов короткого замыкания следует брать вольтамперную характеристику полностью заряженной аккумуляторной батареи, соответствующую самой верхней кривой семейства вольтамперных характеристик, изображенных на фиг. 18.7. Эту характеристику для каждой данной аккумуляторной батареи легко получить опытным путем.

§ 18.4. ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для большинства потребителей электрической энергии на самолете при внезапном понижении напряжения в начале процесса наступает некоторое уменьшение потребляемого тока. В установившемся режиме понижение напряжения может привести как к уменьшению, так и к увеличению потребляемого тока. В некоторых случаях установившееся значение потребляемого тока при понижении напряжения остается постоянным.

С точки зрения установившихся режимов работы оказывается целесообразным ввести понятие трех идеальных вольтамперных характеристик потребителей при установившемся режиме короткого замыкания, а именно:

А — характеристики постоянного сопротивления;

Б — характеристики неизменного тока;

В — характеристики постоянной мощности.

Примером потребителя с вольтамперной характеристикой типа А является потребитель, обладающий постоянным сопротивлением, для которого соотношение между напряжением и током определяется законом Ома:

$$U = I \cdot R. \quad (18.6)$$

К этим потребителям относится большинство потребителей на самолете; к ним может быть отнесен, в частности, и участок питательной или распределительной сети самолета в том случае, если его условно рассматривать в качестве потребителя. Очевидно, для этого типа потребителя вольтамперные характеристики как при установившемся, так и при переходном режимах одни и те же и определяются прямыми линиями (фиг. 18.8), проходящими через начало координат с наклоном к оси абсцисс под углом α , причем $\operatorname{tg} \alpha = R$.

Примером потребителя с вольтамперной характеристикой типа Б является идеальный электродвигатель последовательного возбуждения, работающий при постоянном моменте нагрузки на валу. Это следует из выражения для внутреннего вращающего момента двигателя:

$$M_e = C I_{\text{я}} \Phi_{\text{я}}, \quad (18.7)$$

где $I_{\text{я}}$ — ток якоря двигателя;

$\Phi_{\text{я}}$ — магнитный поток якоря.

Для двигателя последовательного возбуждения величина потока якоря $\Phi_{\text{я}}$ определяется током якоря, и вращающий момент является лишь функцией тока якоря. Поэтому в установившемся режиме при $M_e = \text{const}$ потребляемый двигателем ток также постоянен. При этом вольтамперная характеристика двигателя имеет вид, изображенный на фиг. 18.9.

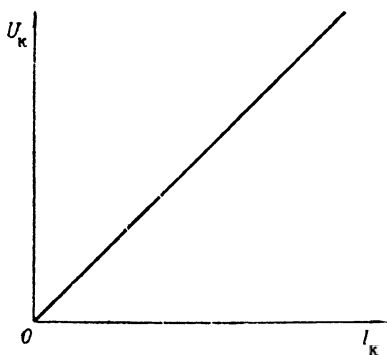
В действительности при некоторой величине напряжения $U_{\min}$ двигатель остановится, и его вольтамперная характеристика при этом опре-

деляется сопротивлением цепи якоря и имеет вид прямой, проходящей через начало координат (пунктирная кривая на фиг. 18.9).

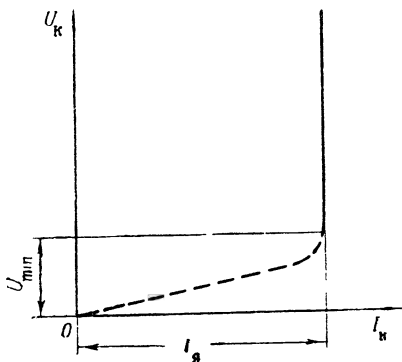
В переходном режиме зависимость между приложенным напряжением и потребляемым током для двигателя последовательного возбуждения определяется уравнением

$$u = cn\Phi_{\text{я}} + i_{\text{я}}R_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt}. \quad (18.8)$$

При этом изменение тока в цепи якоря двигателя во времени имеет вид, представленный на фиг. 18.10.

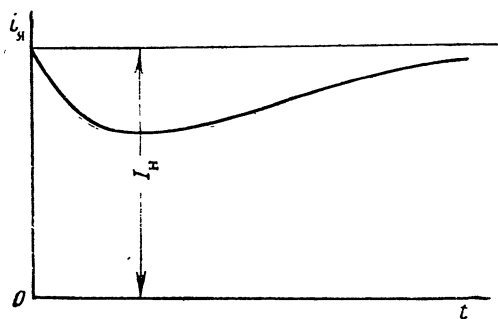


Фиг. 18.8. Вольтамперная характеристика потребителя типа А.

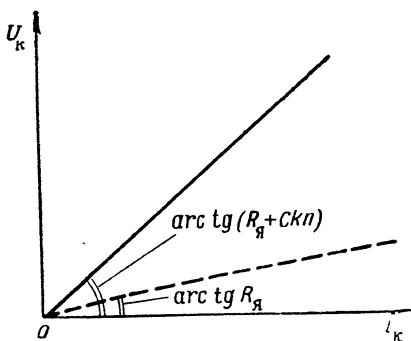


Фиг. 18.9. Вольтамперная характеристика потребителя типа Б в установившемся режиме.

Вблизи экстремального значения тока якоря последним членом в правой части этого уравнения можно пренебречь. Полагая, что в пере-



Фиг. 18.10. Зависимость тока короткого замыкания на зажимах двигателя последовательного возбуждения от времени.



Фиг. 18.11. Вольтамперная характеристика потребителя типа Б в переходном режиме.

ходном режиме скорость вращения двигателя остается неизменной, а магнитная цепь двигателя не насыщена, получают

$$\Phi_{\text{я}} = ki_{\text{я}}, \quad (18.9)$$

$$u = cn\Phi_{\text{я}} + i_{\text{я}}R_{\text{я}} = (ckn + R_{\text{я}})i_{\text{я}} \quad (18.10)$$

или

$$u = R'_{\text{я}}i_{\text{я}}. \quad (18.11)$$

Таким образом, вольтамперная характеристика двигателя последовательного возбуждения в переходном режиме является практически прямой, проходящей через начало координат (фиг. 18.11).

Угол наклона этой прямой, определяемый сопротивлением двигателя в переходном режиме, увеличивается с увеличением скорости вращения. Как видно, переходное сопротивление двигателя больше сопротивления цепи якоря за счет противоэлектродвижущей силы, возникающей в якоре двигателя. На той же фиг. 18. 11 пунктиром проведена вольтамперная характеристика двигателя для того случая, когда противоэлектродвижущая сила равна нулю (двигатель неподвижен).

Примером потребителя с вольтамперной характеристикой типа В является электродвигатель параллельного возбуждения, работающий с постоянным моментом нагрузки и снабженный регулятором постоянства скорости вращения. Такие двигатели применяются для привода электромашиных усилителей, вращающихся преобразователей и т. д.

При резком понижении напряжения скорость вращения в первые моменты времени изменяется незначительно благодаря инерции вращающихся частей и действию регулятора скорости вращения. Поэтому можно принять для начальной стадии режима короткого замыкания $n = \text{const}$.

Если пренебречь изменением потерь в двигателе, то потребляемую им мощность в установившемся режиме короткого замыкания можно считать постоянной независимо от изменения напряжения, так как $P \equiv M \cdot n = \text{const}$ для случая $n = \text{const}$.

Отсюда следует, что вольтамперная характеристика двигателя параллельного возбуждения в установившемся режиме является гиперболой:

$$U = \frac{k}{I_a}, \quad (18. 12)$$

где k — постоянный множитель.

Вольтамперная характеристика двигателя параллельного возбуждения в установившемся режиме изображена на фиг. 18. 12. В действительности вольтамперная характеристика двигателя параллельного возбуждения в установившемся режиме несколько отличается от гиперболы, за счет потерь в якоре и уменьшения скорости вращения двигателя. При некотором напряжении $U_{\min}$ двигатель остановится, и его вольтамперная характеристика будет обусловлена лишь сопротивлением цепи якоря (пунктир на фиг. 18. 12).

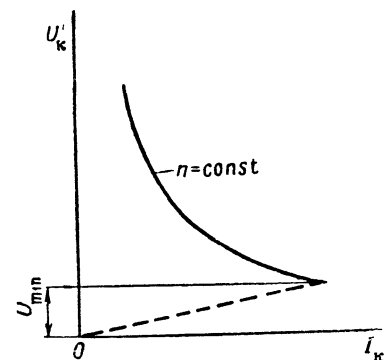
Вольтамперная характеристика двигателя параллельного возбуждения в переходном режиме может быть найдена из уравнения (18. 8).

Пренебрегая по тем же соображениям, которые были высказаны ранее, в этом уравнении э. д. с. самоиндукции $L_a \frac{di_a}{dt}$ и полагая $n = \text{const}$, получают

$$u = E + i_a R_a. \quad (18. 13)$$

В переходном режиме короткого замыкания вследствие инерционности цепи возбуждения магнитный поток, а следовательно, и э. д. с. E можно считать величинами постоянными.

Отсюда следует, что вольтамперная характеристика двигателя параллельного возбуждения в переходном режиме выражается прямой ли-



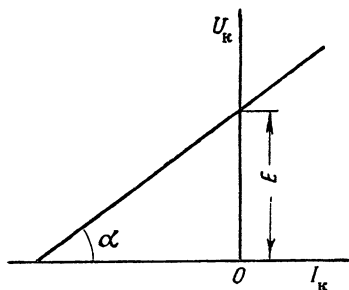
Фиг. 18. 12. Вольтамперная характеристика потребителя типа В в установившемся режиме.

нией с наклоном, определяемым сопротивлением якоря $R_{\text{я}} \equiv \operatorname{tg} \alpha$. Характеристика эта изображена на фиг. 18.13а.

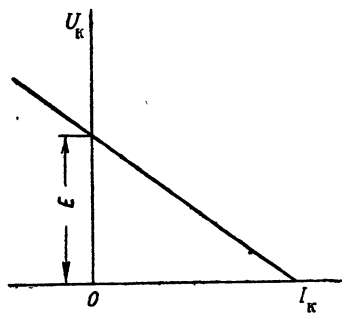
В действительности наклон характеристики получается несколько большим, чем это следует из уравнения (18.13). Это объясняется так же, как и в случае вольтамперных характеристик генератора, некоторым изменением (уменьшением) полезного потока якоря в переходном режиме за счет изменения потока рассеяния полюсов.

Практически можно считать, что при возрастании потребляемого тока до номинального значения напряжение изменяется на величину от 0,1 до 0,25 номинального в зависимости от мощности электродвигателя.

Уравнение, связывающее напряжение на зажимах двигателя с током якоря в переходном режиме, показывает, что при уменьшении напряжения ниже некоторой величины, равной э. д. с. E , ток якоря должен стать отрицательным, т. е. двигатель должен превратиться в генератор.



Фиг. 18.13а. Вольтамперная характеристика потребителя типа В в переходном режиме.



Фиг. 18.13б. Вольтамперная характеристика потребителя типа В в переходном режиме, отнесенная к источникам электрической энергии.

Это явление объясняется тем, что в начальный интервал времени переходного процесса величина э. д. с. якоря E остается постоянной.

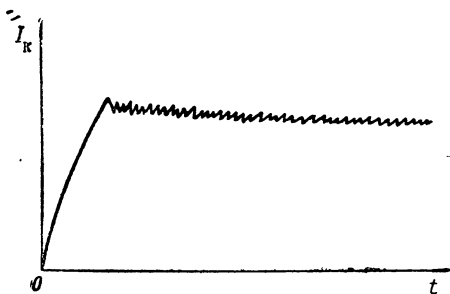
Если короткое замыкание произошло достаточно близко от зажимов двигателя, то напряжение в месте короткого замыкания окажется меньше э. д. с. якоря, и двигатель будет работать в режиме генератора, отдавая ток в сеть к месту короткого замыкания.

Таким образом, при коротком замыкании вблизи двигателя параллельного возбуждения в место короткого замыкания в начальный период посылается ток не только от самолетных источников электрической энергии, но и от двигателей с параллельным возбуждением. Если при этом мощность двигателя велика, то посылаемый им ток может вызвать существенное увеличение полного тока короткого замыкания в начальный этап переходного режима. Поэтому в ряде случаев вольтамперную характеристику двигателя параллельного возбуждения удобно относить к вольтамперным характеристикам генераторов. Для этого в уравнении (18.13) следует изменить знак тока на обратный. Вольтамперная характеристика двигателя параллельного возбуждения в переходном режиме, отнесенная к генераторам электрической энергии, изображена на фиг. 18.13б.

Следует отметить, что хотя в действительности почти ни один из потребителей не обладает характеристикой, точно совпадающей с одной из описанных выше идеальных характеристик, однако разделение всех характеристик на три идеальных типа позволяет значительно облегчить анализ поведения электрической системы в различных аварийных режимах.

Выше, при построении вольтамперных характеристик электродвигателей последовательного и параллельного возбуждения в переходном режиме, ничего не говорилось о том, к какому моменту времени относятся эти характеристики.

В общем случае время достижения экстремального значения тока короткого замыкания для потребителей не равно времени достижения максимального значения тока короткого замыкания для генераторов, поэтому имеются основания опасаться, что совместное рассмотрение ха-



Фиг. 18.14. Осциллограмма тока короткого замыкания на зажимах двигателя параллельного возбуждения.

рактеристик потребителей и генераторов невозможно вследствие того, что эти характеристики построены для различных моментов времени. Исследование и опыты показывают, что переходный ток короткого замыкания потребителей быстро (значительно скорее, чем у генераторов) достигает своего экстремального значения, а затем медленно убывает. Справедливость этого иллюстрирует осциллограмма тока короткого замыкания на зажимах двигателя параллельного возбуждения при отсутствии момента нагрузки на валу

(фиг. 18.14). Это обстоятельство позволяет определять максимальную величину общего тока короткого замыкания по приведенным выше вольтамперным характеристикам генераторов и потребителей.

§ 18.5. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

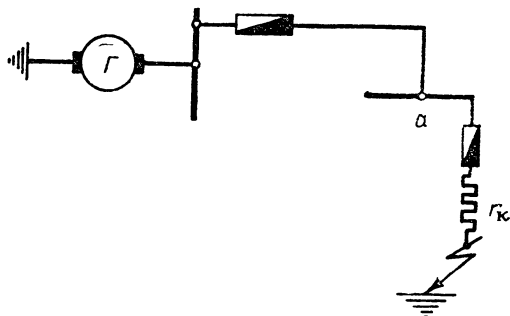
Знание вольтамперных характеристик источников и потребителей постоянного тока на самолете в установившемся и переходном режимах позволяет определять установившиеся и переходные токи короткого замыкания в отдельных точках электрической сети самолета.

Расчет токов короткого замыкания по вольтамперным характеристикам производится следующим образом.

На фиг. 18.15 изображен простейший случай, когда внешнее короткое замыкание имеет место на некотором удалении от генератора постоянного тока.

Пусть сопротивление короткого замыкания является величиной постоянной и равной r_k . Падением напряжения на участке линии от генератора до точки a пока пренебрегают.

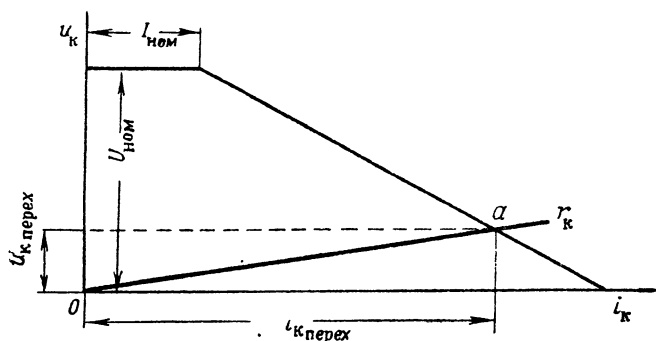
Сопротивление короткого замыкания r_k можно рассматривать как некоторый потребитель электрической энергии с постоянным сопротивлением. Очевидно, напряжение в месте a для генератора как источника электрической энергии равно напряжению в месте a для сопротивления r_k как потребителя электрической энергии.



Фиг. 18.15. Короткое замыкание на распределительном фидере.

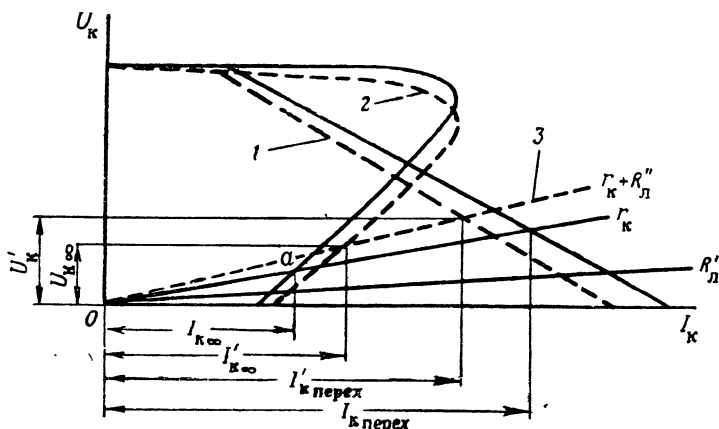
На фиг. 18.16 изображены на одном графике вольтамперные характеристики генератора и сопротивления r_k в переходном режиме.

Так как напряжение в месте a должно быть одинаковым для источника и потребителя, то величина тока и напряжения короткого замыкания в переходном режиме в месте a определяются как абсцисса и ордината точки пересечения вольтамперной характеристики генератора и луча сопротивления r_k .



Фиг. 18.16. Расчет переходного тока к.з. для схемы, изображенной на фиг. 18.15.

Аналогичным образом можно найти величину установившегося тока короткого замыкания. Для этого нужно изобразить на одном графике вольтамперные характеристики генератора и сопротивления r_k в установившемся режиме. На фиг. 18.17 изображены эти характеристики, причем вольтамперная характеристика сопротивления r_k остается такой же, как и в переходном режиме.



Фиг. 18.17. Расчет установившегося тока к.з. для схемы, изображенной на фиг. 18.15.

Следует отметить, что режим работы генератора, соответствующий точке пересечения, в этом случае является малоустойчивым. Незначительные изменения тока $I_{k\infty}$ вызывают перераспределение напряжения между сопротивлением r_k , сопротивлением обмотки якоря и сопротивлением щеточного контакта (падение напряжения в щеточном контуре в этом случае соизмеримо с напряжением $U_{k\infty}$). Поэтому точка a в действительных условиях обычно «ползает» в некоторых пределах за счет случайных изменений соотношений между падениями напряжения в цепи, так как сопротивление щеточного контакта является очень нестабильным.

Обычно установившийся ток короткого замыкания получается меньше переходного тока короткого замыкания. Однако не исключена возможность таких случаев короткого замыкания, когда ток установившегося короткого замыкания может быть и больше переходного тока короткого замыкания (если место короткого замыкания достаточно удалено от зажимов генератора).

В случае если сопротивлением участков линии от источников и потребителей электрической энергии до рассматриваемой точки сети пренебречь нельзя, то в вольтамперные характеристики источников и потребителей электрической энергии необходимо внести поправки на падение напряжения в линии.

Поправки вносят вычитанием из вольтамперных характеристик источников электрической энергии падения напряжения в линии от генератора до рассматриваемой точки сети и прибавлением к вольтамперным характеристикам потребителей соответствующего падения напряжения в линии для каждого данного значения тока.

Если, например, в рассматриваемом выше случае необходимо учесть падения напряжения в линии от генератора до точки a и от сопротивления r_k до точки a , то следует поступить так (фиг. 18. 17).

Вносят поправку на падение напряжения сначала для вольтамперных характеристик генератора; для этого изображают вольтамперные характеристики генераторов в переходном и установившемся режимах и на том же графике проводят луч сопротивления R_{λ}' участка линии от генератора до точки a . Затем для каждого значения тока I производят вычитание из ординаты соответствующей вольтамперной характеристики падения напряжения в линии IR_{λ}' . Полученные таким образом вольтамперные характеристики генератора, отнесенные к точке a , нанесены на фиг. 18. 17 пунктиром (кривые 1 и 2). Затем для каждого значения тока I к вольтамперной характеристике потребителя добавляется соответствующее падение напряжения в линии от потребителя до точки a (IR_{λ}''). Полученная таким образом вольтамперная характеристика потребителя с учетом падения напряжения в линии изображена на фиг. 18. 17 пунктиром (кривая 3).

Нетрудно видеть, что при учете падения напряжения в линии переходной ток короткого замыкания получается меньше, а установившийся — больше.

Если цепь короткого замыкания питается не одним, а несколькими источниками электрической энергии, то необходимо построить объединенную вольтамперную характеристику этих источников относительно рассматриваемого участка сети.

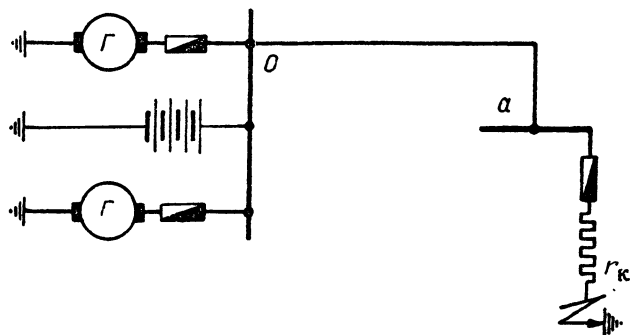
Пусть, например, короткое замыкание произошло в цепи, питаемой от двух генераторов и одной аккумуляторной батареи (фиг. 18. 18).

Если пренебречь сопротивлением участков линии от источников электрической энергии до точки a , то для построения объединенных вольтамперных характеристик группы источников электрической энергии необходимо просуммировать вольтамперные характеристики отдельных источников. Для этого на одном графике изображаются вольтамперные характеристики источников [например, для переходного режима (фиг. 18. 19)], а затем для каждого данного значения напряжения производится суммирование токов отдельных источников в соответствии с их вольтамперными характеристиками.

На фиг. 18. 19 произведено такое суммирование вольтамперных характеристик источников в переходном режиме, а на фиг. 18. 20 — в установившемся режиме (кривая 4). При этом вольтамперные характеристики генераторов постоянного тока 1 и 2 совпадают, так как генераторы

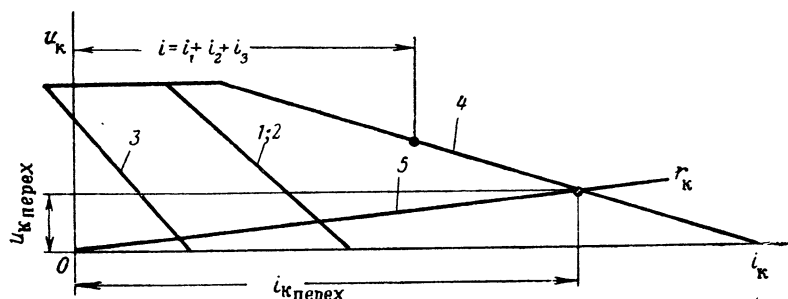
одинаковые, а вольтамперная характеристика аккумулятора 3 для простоты взята прямолинейной.

Для определения тока короткого замыкания необходимо теперь нанести на графиках фиг. 18.19 и 18.20 вольтамперные характеристики со-



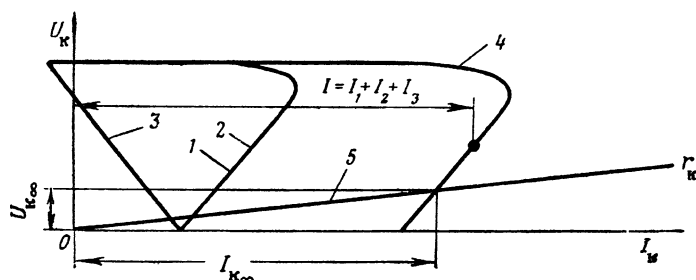
Фиг. 18.18. Короткое замыкание в цепи, питаемой от двух генераторов и аккумуляторной батареи.

противления r_k (прямые 5). Точки пересечения луча сопротивления r_k с результирующими вольтамперными характеристиками группы источников



Фиг. 18.19. Расчет переходного тока к.з. для схемы, изображенной на фиг. 18.18: 1, 2, 3 — вольтамперные характеристики источников; 4 — объединенная вольтамперная характеристика источников; 5 — вольтамперная характеристика сопротивления r_k .

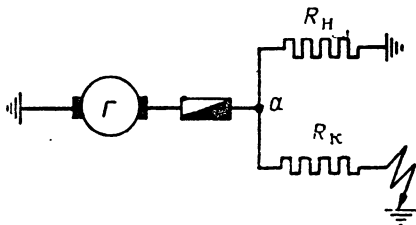
электрической энергии определяют величины тока и напряжения короткого замыкания в соответствующем режиме.



Фиг. 18.20. Расчет установившегося тока к.з. для схемы, изображенной на фиг. 18.18.

Если необходимо учесть падение напряжения в участках линии от источников до точки a , то сначала необходимо привести вольтамперные характеристики источников к точке O , после чего нужно сложить получившиеся вольтамперные характеристики и привести результирующую

вольтамперную характеристику к точке a . В случае если вблизи короткого замыкания включен ряд потребителей электрической энергии, то при наличии этих потребителей и при прочих равных условиях ток в месте короткого замыкания получается меньше, чем в случае их отсутствия, так как эти потребители, шунтируя цепь короткого замыкания, «отсасывают» часть тока короткого замыкания (это не относится к тому случаю, когда в качестве потребителя имеется двигатель параллельного возбуждения, который, как указывалось выше, сам в переходном режиме короткого замыкания может стать генератором).



Фиг. 18.21. Короткое замыкание на зажимах генератора, работающего на потребитель типа А.

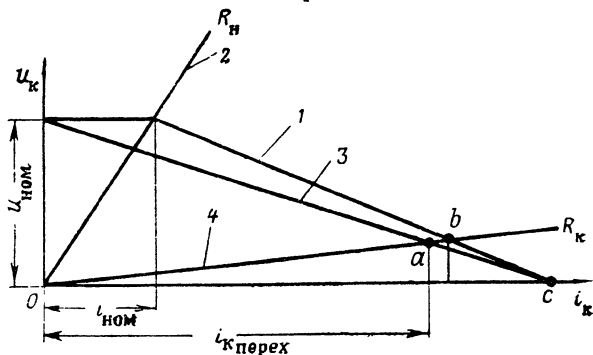
Если параллельно к генератору подключен потребитель, имеющий характеристику типа А (фиг. 18.21), то ток короткого замыкания определяется так. Пусть сопротивление R_H является номинальным сопротивлением нагрузки для генератора; вольтамперная характеристика генератора в переходном режиме, для случая когда короткому замыканию предшествует номинальный

режим работы генератора и минимальная скорость вращения, изображена на фиг. 18.22 (прямая 1).

Вольтамперная характеристика потребителя (прямая 2), имеющего сопротивление R_H , представляет прямую, проходящую через начало координат и точку $i = i_{ном}$, $u = u_{ном}$. При объединении вольтамперных характеристик генератора и потребителя R_H необходимо произвести для каждого данного напряжения вычитание из тока генератора тока нагрузки. Результирующая вольтамперная характеристика изображена на фиг. 18.22 в виде прямой 3.

Результирующую вольтамперную характеристику можно рассматривать по отношению к короткозамкнутой цепи как приведенную вольтамперную характеристику генератора в переходном режиме. Приведенную вольтамперную характеристику генератора в переходном режиме называют иногда характеристикой короткозамкнутой цепи.

Для того чтобы теперь найти переходный ток короткого замыкания, необходимо короткозамкнутую цепь рассматривать как потребитель по отношению к приведенной вольтамперной характеристике генератора. Для этого через начало координат проводят луч сопротивления короткого замыкания 4, и точка пересечения этого луча с характеристикой 3 определяет величину тока короткого замыкания, так как напряжение в точке a является общим как для генератора, так и для короткозамкнутой цепи. Как видно, наличие потребителя R_H несколько снижает ток короткого замыкания по сравнению со случаем, когда потребитель во время короткого замыкания отключен (точка b). Лишь при коротком замыкании на зажимах генератора ($R_K = 0$), ток короткого замыкания $I_{к0}$ не зависит от величины нагрузки R_H (точка c).



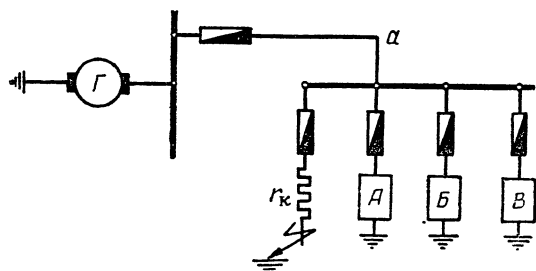
Фиг. 18.22. Расчет переходного тока к.з. для схемы, изображенной на фиг. 18.21.

Расчет токов установившегося короткого замыкания производится аналогичным образом. Следует только иметь в виду, что для установившегося короткого замыкания наиболее неблагоприятным является такой случай, когда скорость вращения генератора является максимальной. Вольтамперная характеристика генератора в установившемся режиме при максимальной скорости вращения и при наличии регулятора напряжения изображена на фиг. 18.23 (кривая 1).

Произведя вычитание для каждого данного напряжения тока вольтамперной характеристики нагрузки 2 из тока вольтамперной характеристики генератора, получают результирующую или приведенную вольтамперную характеристику генератора в установившемся режиме 3.

Величина установившегося тока короткого замыкания определяется точкой *a* пересечения приведенной вольтамперной характеристики генератора с лучом сопротивления R_K . В большинстве случаев величина установившегося тока короткого замыкания получается меньше максимального значения переходного тока короткого замыкания.

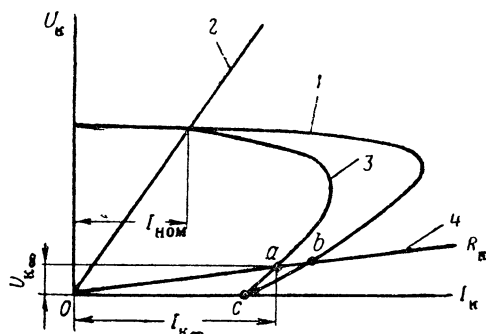
Аналогично могут быть определены токи короткого замыкания, когда к зажимам генератора подключены потребители типов Б и В.



Фиг. 18.24. Схема включения потребителей параллельно к короткозамкнутой цепи.

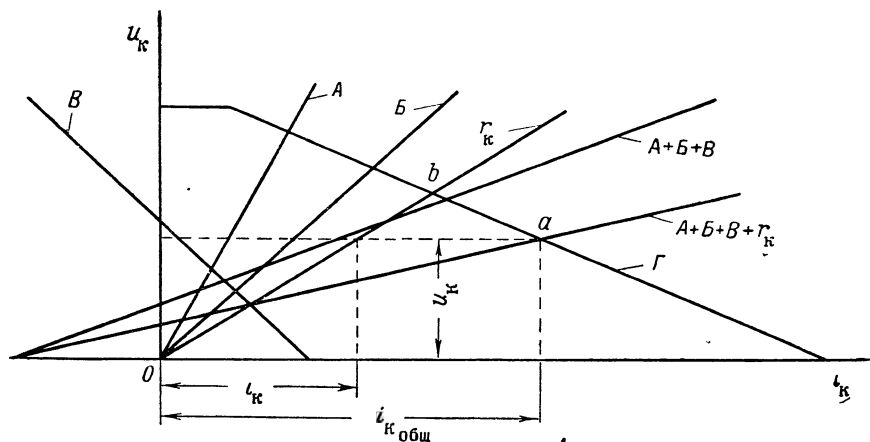
электрической энергии. В некоторых случаях в группу потребителей целесообразно включить и короткозамкнутую цепь. Ниже показано, как это делается применительно к случаю, изображенному на фиг. 18.24.

На одном графике изображают вольтамперные характеристики потребителей А, Б и В для какого-либо режима (например, для переходного, фиг. 18.25). Затем, задаваясь различными значениями напряжения, проводят соответствующие прямые, параллельные оси абсцисс, и осуществляют суммирование токов, соответствующих вольтамперным характеристикам потребителей (кривая $A+B+B$ на фиг. 18.25), учитывая, что для потребителей, имеющих вольтамперную характеристику класса В, при суммировании значения тока нужно брать с обратным знаком. После этого объединенную вольтамперную характеристику потребителей ($A+B+B$) складывают с вольтамперной характеристикой короткозамкнутой цепи r_k . На том же графике наносят вольтамперную характеристику источника электрической энергии или группы источников элек-



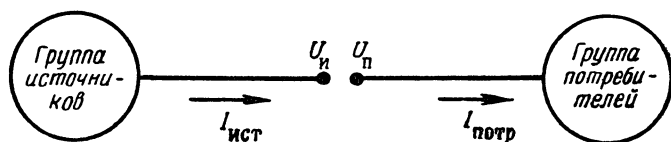
Фиг. 18.23. Расчет установившегося тока к. з. для схемы, изображенной на фиг. 18.21.

трической энергии, приведенную к точке a (кривая Γ). Точка пересечения вольтамперной характеристики источника электрической энергии с объединенной вольтамперной характеристикой группы потребителей, включая и короткозамкнутую цепь относительно точки a , дает значение напряжения U_k и тока короткого замыкания $i_{k,общ}$ в точке a . Для того чтобы найти величину тока короткого замыкания в короткозамкнутой цепи, если она рассматривалась как потребитель, необходимо провести



Фиг. 18.25. Расчет переходного тока к. з. для схемы, изображенной на фиг. 18.24.

через точку a прямую, параллельную оси абсцисс. Абсцисса точки пересечения этой прямой с лучом r_k дает значение тока короткого замыкания I_k в короткозамкнутой цепи. Как видно из фиг. 18.25, ток короткого замыкания получается меньше того тока короткого замыкания, который имел бы место при отсутствии потребителей, включенных параллельно короткозамкнутой цепи (точка b на фиг. 18.25).



Фиг. 18.26. Схема к общему случаю расчета токов к. з. в самолетных сетях постоянного тока.

Теперь можно сформулировать общее правило определения токов короткого замыкания в самолетных электрических сетях постоянного тока по вольтамперным характеристикам. Для определения тока короткого замыкания необходимо в первую очередь объединить все элементы электрической сети, которые должны быть приняты в расчет при определении токов короткого замыкания, в две группы: группу источников электрической энергии и группу потребителей электрической энергии (фиг. 18.26).

Так как эти две группы непосредственно соединены друг с другом, то, очевидно, должны соблюдаться равенства

$$U_{источн} = U_{потреб}; \quad I_{источн} = I_{потреб}.$$

В целях облегчения анализа в группу источников часто целесообразно включать также часть потребителей или все, с тем чтобы группа потребителей состояла только из тех элементов системы (например, цепи

короткого замыкания), для которых необходимо определить токи и напряжения. Далее определяют вольтамперные характеристики группы источников и группы потребителей электрической энергии.

Определение вольтамперной характеристики группы элементов по известным вольтамперным характеристикам этих элементов состоит из двух основных этапов: 1) объединения характеристик отдельных элементов, приключенных к одной и той же точке или одной и той же шине сети, и 2) введения поправки, если это необходимо, на падение напряжения в линии. Процесс объединения характеристик отдельных элементов, приключенных к одной и той же точке сети, заключается в алгебраическом сложении токов отдельных элементов, соответствующих одному и тому же напряжению. При этом если потребители объединяются в группу источников, то их токи должны быть взяты с обратными знаками.

Вводить поправку на падение напряжения в линии необходимо в том случае, если вольтамперную характеристику элемента или нескольких элементов необходимо отнести к точке сети, отделенной от пункта присоединения этих элементов участком линии.

С этой целью в случае группы источников вычитают падение напряжения в линии, в случае же группы потребителей прибавляют падение напряжения в линии и получают новую вольтамперную характеристику, отнесенную к другой точке сети. Точка пересечения объединенных вольтамперных характеристик группы источников и группы потребителей, в которую включена короткозамкнутая цепь, определяет искомое значение тока короткого замыкания.

Выше указывалось, что при прочих равных условиях токи короткого замыкания при наличии подключенных к сети потребителей электрической энергии меньше, чем при их отсутствии. В условиях полета бывает трудно установить, какие потребители окажутся включенными при возникновении короткого замыкания. Поэтому при практических расчетах токов короткого замыкания часто влиянием потребителей электрической энергии на величины токов короткого замыкания пренебрегают. Если при таких расчетах исходить из вольтамперных характеристик генераторов, соответствующих наибольшему возможному величинам токов короткого замыкания, то получается некоторый запас, т. е. несколько завышенные значения токов короткого замыкания.

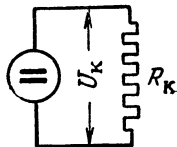
§ 18.6. ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Графо-аналитический метод расчета токов короткого замыкания основан на спрямлении вольтамперных характеристик источников электрической энергии, которое дает возможность свести расчеты токов короткого замыкания к простой задаче нахождения токораспределения в электрических цепях, питаемых от линейных источников электрической энергии. Для цепи, питаемой от линейного источника электрической энергии (фиг. 18.27), можно написать:

$$U = E - I r_{\text{вн}},$$

где E — э. д. с. линейного источника, а $r_{\text{вн}}$ — внутреннее сопротивление линейного источника.

Вольтамперная характеристика такого линейного источника приведена на фиг. 18.28. Как видно, вольтамперная характеристика отсекает на оси ординат напряжение, равное э. д. с. E , и имеет угол наклона к оси абсцисс, равный $\arctg r_{\text{вн}}$. Очевидно, что всякий источник электрической энергии, вольтамперная ха-



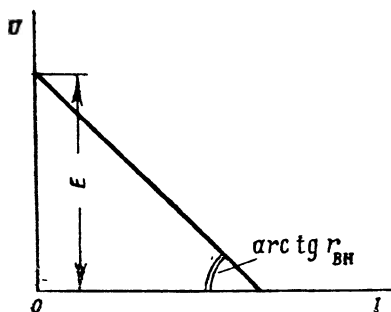
Фиг. 18.27. Схема цепи, питаемой от линейного источника электрической энергии

рактеристика которого прямолинейна, может рассматриваться как линейный источник электрической энергии, т. е. источник, имеющий постоянные э. д. с. и внутреннее сопротивление.

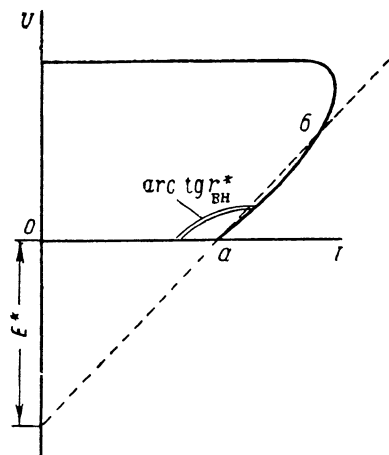
Если, например, область изменения токов и напряжений на зажимах самолетного генератора постоянного тока при установившихся коротких замыканиях не выходит за пределы участка $a-b$ вольтамперной характеристики, приведенной на фиг. 18. 29, то генератор можно рассматривать как линейный источник электрической энергии, э. д. с. которого E^* равна отрезку, отсекаемому на оси ординат вольтамперной характеристикой, спрямленной на участке $a-b$ (пунктир на фиг. 18. 29), а внутреннее сопротивление $r_{вн}^*$ — тангенсу угла наклона этой прямой к оси абсцисс.

Полученные таким образом э. д. с. и внутреннее сопротивление генератора называются расчетными и используются для графо-аналитических расчетов токов короткого замыкания.

В рассматриваемом случае расчетные э. д. с. и внутреннее сопротивление получаются отрицательными, это необходимо учитывать при вы-



Фиг. 18. 28. Вольтамперная характеристика линейного источника электрической энергии.



Фиг. 18. 29. Спрявление вольтамперной характеристики самолетного генератора постоянного тока.

полнении расчетов токов короткого замыкания. При этом расчеты токов короткого замыкания целесообразно вести в относительных единицах.

Преимущество проведения расчетов токов короткого замыкания в относительных единицах, помимо простоты и наглядности, состоит также в том, что самолетные генераторы постоянного тока серии ГСР имеют одинаковые относительные вольтамперные характеристики. На фиг. 18. 30 изображены установившаяся, а на фиг. 18. 31 переходная вольтамперные характеристики генераторов серии ГСР, работающих с регулятором напряжения в относительных единицах.

В качестве базисных величин, к которым относятся все токи и напряжения, здесь взяты номинальное напряжение генератора 28,5 в и номинальный ток, равный номинальной мощности генератора, поделенной на номинальное напряжение. При этом за базисную величину сопротивления необходимо принять величину сопротивления, равную отношению номинального напряжения к номинальному току генератора.

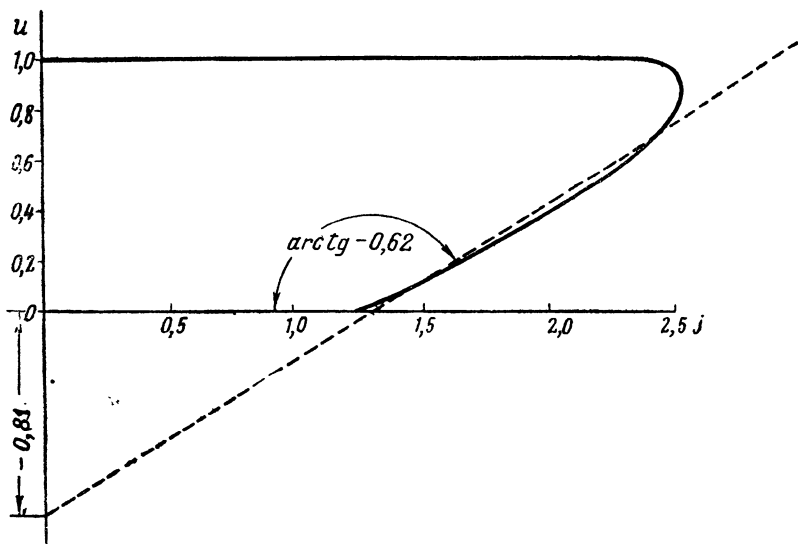
Из относительных вольтамперных характеристик, приведенных на фиг. 18. 30 и 18. 31, следует, что при графо-аналитических расчетах установившихся токов короткого замыкания в относительных единицах генераторы ГСР должны вводиться относительной э. д. с. ε^* :

$$\varepsilon^* = \frac{E^*}{U_{\text{ном}}} = -0,81$$

и относительным внутренним сопротивлением $\rho_{\text{вн}}^*$:

$$\rho_{\text{вн}}^* = \frac{R_{\text{вн}}^*}{\frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}}} = \operatorname{tg} \alpha = -0,62,$$

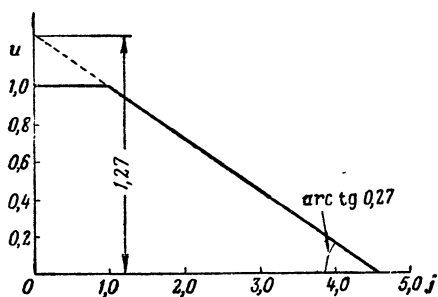
а при расчетах переходных токов короткого замыкания $\epsilon^* = 1,27$ и $\rho_{\text{вн}}^* = 0,27$.



Фиг. 18.30. Установившаяся вольтамперная характеристика генераторов серии ГСР в относительных единицах.

Если в расчетную схему входят аккумуляторные батареи, то они также должны быть введены соответствующими относительными расчетными э. д. с. и внутренними сопротивлениями. После введения в расчетную схему самолетных генераторов и аккумуляторных батарей эквивалентными линейными источниками электрической энергии расчет токов короткого замыкания сводится к определению токораспределения в схеме с постоянными параметрами.

При практических расчетах обычно нагрузка в сети не учитывается, т. е. принимают, что все генераторы отдают ток только к месту короткого замыкания.



Фиг. 18.31. Переходная вольтамперная характеристика генераторов серии ГСР в относительных единицах.

§ 18.7. О РАСЧЕТАХ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В САМОЛЕТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Расчеты токов короткого замыкания в самолетных электрических сетях переменного тока с несколькими синхронными генераторами в общем случае весьма сложны и трудоемки. Поэтому при практических расчетах пользуются приближенными методами расчета токов короткого замыкания, основанными на ряде допущений. Разработано довольно боль-

шое число таких упрощенных методов расчета, пригодных для повседневной практики.

Наиболее распространен графо-аналитический метод расчета, аналогичный описанному выше графо-аналитическому расчету токов короткого замыкания в самолетных сетях постоянного тока. Не затрагивая строгого обоснования этого метода, которое выходит за рамки настоящего курса, здесь рассматривается лишь практическая сторона вопроса расчета токов короткого замыкания.

Суть метода расчета сводится к следующему. Составляется эквивалентная схема рассчитываемой самолетной электрической сети переменного тока, в которой синхронные генераторы (работающие параллельно) вводятся своими расчетными электродвижущими силами E^* и расчетными реактантами x^* , которые принимаются постоянными за все время короткого замыкания (обычно при расчетах токов короткого замыкания в сетях переменного тока активными сопротивлениями пренебрегают). После такой замены синхронных генераторов источниками переменного тока с постоянными э. д. с. и внутренними сопротивлениями задача расчета токов короткого замыкания превращается в обычную электротехническую задачу по нахождению токораспределения в заданной электрической цепи с несколькими источниками питания. Для решения этой задачи следует использовать уравнение Кирхгофа и известные из общей электротехники методы расчета токораспределения и преобразования электрических цепей. Вся сложность расчета токов короткого замыкания сводится, таким образом, к определению тех расчетных значений э. д. с. и реактантов, которыми должны быть представлены генераторы в эквивалентной схеме замещения.

Расчет установившихся токов короткого замыкания

Наиболее просто с помощью графо-аналитического метода определяется установившийся ток трехфазного короткого замыкания. При этом синхронный генератор вводится в схему замещения своими расчетной э. д. с. E_∞^* и расчетным реактантом x_∞^* . Так, если в сети работает один синхронный генератор без регулятора напряжения, то расчет тока установившегося короткого замыкания осуществляется по формуле

$$I_\infty = \frac{E_\infty^*}{x_\infty^* + x_c}, \quad (18.14)$$

где E_∞^* — расчетная э. д. с. генератора;

x_∞^* — расчетный синхронный реактанс генератора;

x_c — реактанс приведенной до места короткого замыкания электрической сети.

Ориентировочно расчетная э. д. с. и расчетный синхронный реактанс могут быть определены по формулам:

$$E_\infty^* = \left(0,2 + \alpha \frac{I_n}{I_{B, \text{ном}}}\right) U_{\text{ном}}; \quad (18.15)$$

$$x_\infty^* = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} I_{\text{ном}} \text{ОКЗ}} \left(0,2 \frac{I_{B, \text{ном}}}{I_B} + \alpha\right), \quad (18.16)$$

где $I_{B, \text{ном}}$ — номинальный ток возбуждения генератора;

$U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение генератора (линейное);

$I_{B, \text{ном}}$ — номинальный фазовый ток генератора;

ОКЗ — относительный установившийся ток трехфазного короткого замыкания при номинальном токе возбуждения (дается в паспорте генератора) $\alpha \approx 0,8$.

Если генератор работает с регулятором напряжения, то различают два возможных режима установившегося трехфазного короткого замыкания.

Первый режим, так называемый режим предельного возбуждения, имеет место при коротком замыкании вблизи зажимов синхронного генератора и характеризуется тем, что напряжение на зажимах генератора меньше номинального. Другими словами, в этом режиме короткого замыкания регулятор напряжения не в состоянии обеспечить поддержание постоянного напряжения на зажимах генератора ($U_{\infty} \leq U_{\text{ном}}$). В этом случае синхронный генератор должен быть введен в схему замещения расчетными э. д. с. E_{∞}^* и реактансом x_{∞}^* , как это уже было указано выше.

Второй режим, так называемый режим номинального напряжения, получается в том случае, если при установившемся коротком замыкании напряжение на зажимах генератора равно номинальному, т. е. регулятор напряжения в состоянии обеспечить поддержание постоянного напряжения. Очевидно, это может быть лишь тогда, когда короткое замыкание достаточно удалено от зажимов генератора. В этом случае синхронный генератор вводится в схему замещения как источник переменного напряжения, у которого внутреннее сопротивление равно нулю, а э. д. с. равна номинальному напряжению генератора. При этом для сети, питаемой от одного генератора, формула (18.14) для расчета тока установившегося короткого замыкания принимает простой вид:

$$I_{\infty} = \frac{U_{\text{ном}}}{x_c}. \quad (18.17)$$

При расчетах токов установившегося трехфазного короткого замыкания в сети, питаемой от нескольких синхронных генераторов, нельзя заранее установить, в каком режиме при рассматриваемом коротком замыкании будет работать каждый генератор, снабженный регулятором напряжения. Поэтому приходится ориентировочно задаваться наиболее вероятным режимом работы того или иного генератора и вводить его в схему замещения расчетными параметрами (E_{∞}^* и x_{∞}^* или $U_{\text{ном}}$ и нуль). После этого следует найти ток в месте короткого замыкания и затем, найдя токораспределение в схеме, определить, правильно ли были выбраны режимы работы генераторов. Если в результате проверки окажется, что режим работы тех или иных генераторов выбран неверно, то расчет необходимо повторить и снова сделать соответствующую проверку. В практике выбор правильного режима работы обычно не составляет труда. Как правило, в самолетных электрических сетях при коротких замыканиях генераторы работают в режиме предельного возбуждения.

Несколько более сложную задачу представляет расчет токов несимметричных установившихся коротких замыканий. Анализ режимов несимметричных коротких замыканий наиболее просто производить на основе метода симметричных составляющих.

Для расчета токов несимметричного короткого замыкания необходимо знать реактансы обратной и нулевой последовательностей участка линии от генератора до места короткого замыкания. Известно, что для всякого элемента электрической цепи, магнитно-связанные цепи которого неподвижны друг относительно друга, реактансы прямой и обратной последовательностей одинаковы, так как от перемены порядка чередования фаз протекающей через этот элемент симметричной трехфазной системы токов взаимоиנדукция между его фазами не изменяется. Вследствие этого реактанс обратной последовательности трансформаторов, реакторов и участков линии сети равен реактансу прямой последовательности. Что же касается реактанса нулевой последовательности, то для его опреде-

ления должна быть составлена схема замещения для токов нулевой последовательности. Указание о том, как определяется в этих случаях реактанс нулевой последовательности, можно найти в соответствующих руководствах.

После того как реактансы прямой, обратной и нулевой последовательностей всех элементов цепи короткого замыкания найдены, можно приступить к расчету токов несимметричных коротких замыканий методом симметричных составляющих.

Расчет тока короткого замыкания при двухфазном коротком замыкании (фиг. 18.32) можно производить по формуле

$$I_{\kappa}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}E}{x_1 + x_2},$$

а при однофазном коротком замыкании (на фиг. 18.32 пунктир)

$$I_{\kappa}^{(1)} = \frac{3E}{x_0 + x_1 + x_2},$$

где E — расчетная э. д. с. прямой последовательности; x_0 ; x_1 и x_2 — суммарные реактансы (включающие в себя расчетные реактансы генератора и реактансы участка сети от генератора до места короткого замыкания) для нулевой прямой и обратной последовательностей.

При переходном режиме реактивность прямой последовательности генератора изменяется с течением времени: для начального момента она равна сверхпереходному реактансу x_d'' , при неучете токов в демпферных цепях — переходному реактансу x_d' и для установившегося режима — синхронному реактансу x_d .

Реактивности прямой и обратной последовательностей генератора можно считать практически постоянными, не зависящими от времени.

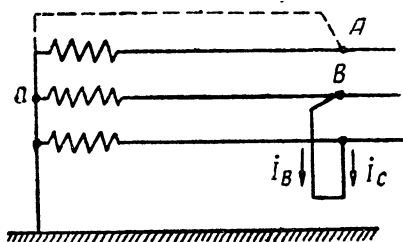
Токи прямой, обратной и нулевой последовательностей зависят от соотношения реактанцев различных последовательностей, поэтому начиная от момента короткого замыкания вплоть до установившегося режима непрерывно изменяются токи прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Расчет переходных токов короткого замыкания

Расчет переходных токов короткого замыкания в самолетных сетях переменного тока представляет собой значительно более сложную задачу, чем расчет установившихся токов короткого замыкания, и выходит за рамки настоящего курса. Ниже приводятся лишь формулы, позволяющие иметь ориентировочные данные о величинах переходного, сверхпереходного и ударного токов трехфазного короткого замыкания в трехфазной сети с односторонним питанием.

Начальное значение переходного тока короткого замыкания можно определить по формуле, аналогичной формуле для определения установившегося тока трехфазного короткого замыкания на зажимах синхронного генератора:

$$I' = \frac{E}{x_d' + x_c}, \quad (18.18)$$



Фиг. 18.32. Двухполюсное и однополюсное короткое замыкание на зажимах синхронного генератора.

где E — э. д. с. генератора перед коротким замыканием;

x'_d — переходный реактанс генератора;

x_c — приведенный реактанс участка сети от зажимов генератора до места короткого замыкания.

Начальное значение сверхпереходного тока короткого замыкания определяют по формуле

$$I'' = \frac{E}{x'_d + x_c}, \quad (18.19)$$

где x''_d — сверхпереходный реактанс генератора.

Так как $x''_d < x'_d$, то сверхпереходный ток короткого замыкания в большей степени зависит от реактанта сети, чем переходный ток короткого замыкания.

Апериодическая составляющая тока короткого замыкания должна учитываться при определении динамических (ударных) действий токов короткого замыкания на шины распределительных устройств. С учетом этой составляющей максимальное мгновенное значение тока, имеющее место в начальный период короткого замыкания и носящее название ударного тока короткого замыкания, определяется по формуле

$$i_y = y \sqrt{2} I'', \quad (18.20)$$

где y — так называемый ударный коэффициент, равный 1,8.



Глава XIX

ЗАЩИТА САМОЛЕТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

§ 19.1. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТЕ САМОЛЕТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Одним из основных требований к самолетной электрической сети является требование надежности работы и живучести сети в любых условиях эксплуатации и особенно в условиях боевых действий и аварийных режимов работы.

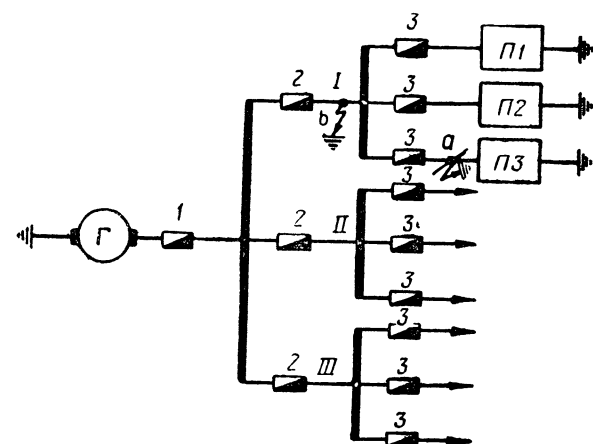
Для повышения надежности действия и для предотвращения тяжелых последствий аварийных режимов работы применяется защита самолетных электрических сетей.

Защита самолетных электрических сетей предназначена для того, чтобы возникающие в процессе эксплуатации короткие замыкания

и перегрузки не приводили к развитию аварии и нарушению нормальной работы.

Таким образом, защита самолетных электрических сетей служит не для предотвращения коротких замыканий и перегрузок, а лишь для предотвращения тех тяжелых последствий, к которым могут привести короткие замыкания и перегрузки.

При этом защита самолетной электрической сети должна быть такой, чтобы можно было свести к минимуму количество потребителей, лишаящих-



Фиг. 19.1. Участок самолетной электрической сети с защитной аппаратурой.

ся питания электрической энергией после срабатывания защиты. Для обеспечения этого требования защита самолетной электрической сети должна обладать селективностью (избирательностью) действия, т. е. способностью отключать только поврежденный участок сети.

Для примера ниже рассматривается участок самолетной электрической сети от генератора до одного из потребителей ПЗ (фиг. 19.1). На схеме фиг. 19.1 защитная аппаратура в отдельных цепях показана условно в виде плавких предохранителей.

При коротком замыкании на зажимах потребителя (точка а) ток короткого замыкания потечет через элементы защиты 1, 2 и 3. Если при

этом ток короткого замыкания вызовет срабатывание защиты 1 генератора, то все остальные потребители будут лишены питания; если же сработает защита 2, то, помимо потребителя ПЗ, питания лишаются также все потребители, присоединенные к щитку 1.

Для того чтобы последствия короткого замыкания в точке *a* были минимальными, должна сработать защита 3. В этом случае от сети отключится лишь потребитель ПЗ, все же остальные потребители будут продолжать нормально работать.

Что касается элементов защиты 1 и 2, то они должны быть подобраны так, чтобы в случае неисправности защиты 3 сработала защита 2, а не защита 1.

Такая работа защиты называется избирательной или селективной. При избирательной или селективной работе отключается лишь поврежденный участок электрической сети, т. е. последовательно включенная аппаратура защиты работает так, что сначала срабатывает элемент защиты, расположенный у места короткого замыкания, и только потом в случае отказа срабатывают элементы защиты по восходящей линии от места короткого замыкания к источнику электроэнергии. Очевидно, что для обеспечения селективности действия защиты необходимо соответствующим образом подбирать выдержки времени срабатывания отдельных элементов защиты.

Минимальной выдержкой времени должна обладать защита, расположенная у потребителя электрической энергии, максимальной выдержкой времени — защита, расположенная у источника. Промежуточные элементы защиты, находящиеся между защитой генератора и защитой потребителя, должны обладать выдержками времени по восходящей линии от потребителя. Это значит, что выдержка времени защиты, смежной с защитой, расположенной ближе к генератору, должна быть на ступень меньше выдержки времени этой смежной защиты. Такое ступенчатое распределение выдержки времени включенных последовательно элементов защиты обеспечивается, как это будет видно дальше, подбором соответствующих амперсекундных характеристик защит.

Однако здесь следует отметить, что в ряде случаев при коротких замыканиях в самих генераторах электрической энергии для предотвращения выхода их из строя может потребоваться как можно более быстрое (мгновенное) отключение их от сети. Поэтому появляется необходимость в дополнение к защите, обеспечивающей селективность отключения генератора, устанавливать защиту (например, дифференциальную), которая отключала бы генератор от сети мгновенно при появлении короткого замыкания в самом генераторе. В некоторых случаях не удается одновременно удовлетворить требованиям селективности и быстроты отключения короткого замыкания, поэтому приходится идти на применение менее селективной, но более быстродействующей защиты.

Например, в радиальных сетях линия часто имеет большое число последовательно включенных участков. Обеспечение селективного действия защиты отдельных участков приводит к необходимости иметь большие выдержки времени на защитах головных участков. Вследствие этого короткие замыкания на головных участках, если не применять специальных мер, могут тяжело отражаться на всей электрической системе передачи и распределения энергии на самолете. В этом случае можно пойти на одновременное отключение нескольких последовательных участков линии, уменьшая за счет этого выдержку времени защиты.

К защите самолетных электрических сетей предъявляются следующие требования: надежность, селективность и инерционность действия,

быстродействие, чувствительность, простота защиты, минимальные вес и габариты.

Защита должна работать надежно при всех случаях ненормальных режимов работы, на которые она рассчитана, и в то же время не должна срабатывать под влиянием каких-либо других причин, не вызванных аварийным состоянием электрической сети.

Ненадежно работающая защита может привести к свариванию друг с другом частей, замкнувшихся при коротком замыкании, что является наиболее тяжелым видом аварии. При этом вдоль всей линии поврежденной цепи протекает ток короткого замыкания, вызывающий быстрое повышение температуры токоведущих частей и последующее воспламенение изоляции вдоль всей линии поврежденного участка сети. При этом появляется также опасность возникновения пожара на всем самолете, так как поврежденный участок сети может проходить в таких частях самолета, где имеется концентрация паров горючих веществ. Если сечение сварившихся токонесущих частей велико, то вследствие резкого снижения напряжения может выйти из строя вся система энергоснабжения самолета.

В других случаях дуга, возникшая при коротком замыкании, приводит к выгоранию металла, вследствие чего контакт в месте короткого замыкания периодически нарушается (так называемое перемежающееся короткое замыкание). Такое перемежающееся короткое замыкание, носящее периодический характер, является очень опасным видом аварии, так как, несмотря на сравнительно небольшую среднюю величину тока короткого замыкания, вероятность возникновения при этом пожара велика.

Наконец, выделение большого количества едких газов и дыма от горящей изоляции ухудшает физиологические условия работы экипажа в герметических кабинах и оказывает на экипаж вредное психологическое действие. В то же время неправильно сработавшая защита во время боевых действий может явиться причиной невыполнения боевого задания или аварии самолета.

Селективное действие защиты позволяет наиболее полно использовать электрическую сеть самолета при всех видах возможных коротких замыканий и перегрузок, что особенно важно в условиях боевых действий.

В некоторых случаях, помимо селективности действия, к защите предъявляются также требования достаточной инерционности действия. Это вызвано тем, что пусковые токи в некоторых участках самолетной электрической сети могут значительно превосходить номинальные. Для предотвращения срабатывания защиты при наличии этих пусковых токов и ставится требование инерционности действия защиты. Если защита будет реагировать на токи перегрузки с запозданием, то при кратковременном протекании этих перегрузочных токов отключения потребителей не произойдет. Если защита потребителей, пусковые токи которых значительно превосходят номинальные, должна быть инерционной, то защита питательных участков сети должна действовать практически мгновенно.

Быстродействие защиты позволяет уменьшить влияние коротких замыканий в сети на работу потребителей, повышает качество электрической энергии, уменьшает размеры разрушения участков сети при коротких замыканиях и предотвращает в ряде случаев потерю устойчивости всей системы энергоснабжения при авариях. При понижении напряжения, если оно длится достаточно долго, скорость вращения двигателей снижается, а некоторые сильно нагруженные двигатели могут остановиться совсем. Это приводит к снижению производительности рабочих механизмов и значительному увеличению токов, потребляемых двигателями по-

следовательного возбуждения. Если через некоторый промежуток времени короткое замыкание отключается, то напряжение в электрической сети резко возрастает. При этом двигатели оказываются в пусковом режиме, и общий ток, потребляемый ими, может превзойти допустимую величину. Это может вызвать отключение источников электрической энергии, если предусмотрена их защита, может нарушиться устойчивость параллельной работы самолетных генераторов, возникнуть явления хлопанья контактов минимальных реле и т. д. При быстродействующей защите скорость вращения двигателей за время отключения короткого замыкания не успевает измениться и нормальная работа их после отключения короткого замыкания не нарушается.

Снижение напряжения в результате недостаточного быстродействия защиты приводит к резкому уменьшению светового потока осветительных устройств, например, самолетной фары, что в свою очередь может послужить причиной аварии.

Быстрое отключение короткого замыкания уменьшает размеры повреждения в месте короткого замыкания, вызванного наличием дуги, и позволяет предотвратить затягивание аварийного режима.

Защита должна реагировать на повреждения по возможности в начальной стадии, что позволяет уменьшить влияние поврежденного участка сети на неповрежденные. Особенно это относится к защите питательной сети самолета. Нагрузочные токи в отдельных участках питательной сети тяжелых самолетов достигают нескольких тысяч ампер, в то же время токи, вызванные короткими замыканиями в отдельных участках сети, могут быть меньше этих максимально возможных нагрузочных токов. Это приводит к тому, что защита таких участков питательной сети должна реагировать не на максимальную величину тока, а должна быть построена на ином принципе, например, на дифференциальном. В этом случае особенно высокие требования предъявляются к чувствительности защиты, так как только при достаточно высокой чувствительности защиты может быть осуществлена правильная ее работа.

Требование простоты защиты, ее минимального веса и габаритов становится особенно понятным, если учесть, что на современных самолетах для обеспечения безотказности работы потребителей и живучести электрической сети должно быть установлено весьма значительное количество защитной аппаратуры. Достаточно сказать, что на современном тяжелом бомбардировщике только для защиты распределительных фидеров применяются сотни защитных устройств.

Естественно, что если защита будет сложной и громоздкой, то установка ее на самолете может усложнить эксплуатацию электрооборудования и привести к значительному увеличению веса и пространства, занимаемого электрооборудованием на самолете.

§ 19.2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АППАРАТУРЕ ЗАЩИТЫ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ САМОЛЕТА

Выше указывалось, что электрическая сеть самолета делится на питательную и распределительную.

Распределительная сеть на самолете значительно более разветвлена, чем питательная, поэтому вероятность повреждений в распределительной электрической сети больше.

Кроме того, опыт эксплуатации электрооборудования самолета показывает, что наиболее часто причиной ненормального состояния самолетной электрической сети являются короткие замыкания и перегрузки потребителей электрической энергии, находящихся в распределительной

сети. Поэтому на самолете в первую очередь необходимо обеспечить защиту распределительной сети, т. е. отдельных фидеров.

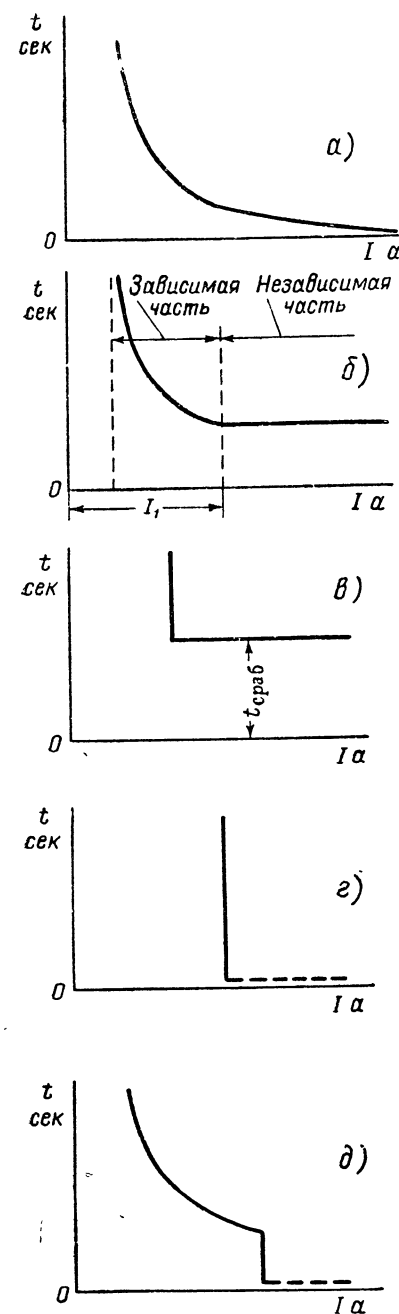
Следует отметить, что вопросы защиты потребителей электроэнергии на самолетах возникли в самом начале применения электроэнергии на самолетах. Первоочередное развитие защиты распределительной сети объясняется также и тем, что бортовая сеть старых самолетов почти сплошь состояла из питательных фидеров с централизованной системой распределения от одной системы шин.

В качестве параметра, на который должна реагировать защита распределительной сети, принимается величина превышения тока фидера над номинальным значением. При этом защита должна действовать так, чтобы по возможности скорее отключать поврежденный фидер от остальной сети при коротких замыканиях и вместе с тем максимально использовать перегрузочную способность потребителя при перегрузках. На самолете имеется ряд потребителей, допускающих значительные кратковременные превышения тока нагрузки над номинальным (электродвигатели, фары, нагревательные приборы). Защита распределительной сети не должна реагировать на эти нормальные превышения тока нагрузки за счет инерционности действия аппаратов защиты.

Для защиты распределительных сетей на самолете нашли широкое применение плавкие вставки и биметаллические автоматы. Эти защитные устройства относятся к максимальным токовым аппаратам, так как воспринимающий чувствительный элемент этих аппаратов реагирует на превышение тока нагрузки над номинальным значением.

Основными свойствами этих защитных устройств, определяющими эффективность их действия, являются так называемые амперсекундные характеристики, представляющие собой зависимость времени срабатывания защитного устройства от величины тока перегрузки или короткого замыкания.

В технике защиты различают несколько основных типов амперсекундных



Фиг. 19.2. Амперсекундные характеристики максимальных защит.

характеристик максимальных токовых аппаратов. Характеристики эти изображены на фиг. 19.2.

Характеристики первого типа (фиг. 19.2,а) называются зависимыми. Время срабатывания аппаратов защиты с зависимыми амперсекундными

характеристиками уменьшается с увеличением тока перегрузки. Такими характеристиками, как будет видно дальше, обладают плавкие предохранители и тепловые автоматы защиты. Выдержка времени в срабатывании этих аппаратов обусловлена инерционностью их действия.

Характеристика, изображенная на фиг. 19.2,б, относится к типу ограниченно зависимых характеристик. Как видно из этой характеристики, до определенной величины тока $I=I_1$ эта характеристика является обычной зависимой, а начиная с величины тока $I=I_1$ время срабатывания не зависит от величины тока нагрузки. Для получения такой характеристики в цепях постоянного тока необходимы специальные устройства. В цепях переменного тока такая характеристика может быть получена с помощью насыщающегося трансформатора тока, ограничивающего величину вторичного тока независимо от первичного.

Следующая характеристика (фиг. 19.2,в) относится к независимым характеристикам. Время срабатывания защиты здесь не зависит от величины тока нагрузки. Осуществить такую характеристику можно с помощью мгновенно действующего пускового органа и элемента выдержки времени (например, реле времени).

Характеристика, изображенная на фиг. 19.2,г, относится к мгновенным характеристикам. Такой характеристикой обладают почти все электромагнитные аппараты постоянного и переменного тока. С точки зрения отключения короткого замыкания такая характеристика наиболее желательна.

Большой интерес представляет зависимая амперсекундная характеристика с отсечкой, представляющая собой комбинацию зависимой и мгновенной характеристик (фиг. 19.2,д). Эту характеристику можно получить, если тепловой автомат защиты дополнить мгновенно действующим электромагнитным устройством, настроенным на ток срабатывания, называемый током отсечки.

Для защиты самолетных питательных фидеров наибольший интерес представляют зависимые характеристики, которыми обладают тепловые автоматы и частично плавкие предохранители. Эти характеристики позволяют получить, с одной стороны, требуемое быстродействие при отключении токов короткого замыкания, с другой стороны, — требуемую чувствительность к токам перегрузки и инерционность при пусковых токах и кратковременных толчках нагрузки. Ограниченно зависимая характеристика в питательных фидерах приводит к излишней и вредной затяжке процесса отключения короткого замыкания. Эта характеристика может представить интерес только для селективной защиты радиальных линий, так как позволяет обеспечить для любой кратности тока короткого замыкания требуемую по условиям селективности ступень выдержки времени между защитными аппаратами соседних последовательных участков линии.

Аппаратура защиты с независимой характеристикой имеет довольно сложную конструкцию и для защиты самолетных электрических сетей большого интереса не представляет.

Мгновенная характеристика не обеспечивает селективности и инерционности действия защиты, поэтому в фидерах потребителей ее использование нецелесообразно. Однако она представляет большой интерес для защиты питательных сетей, основанной на дифференциальном принципе.

Зависимая амперсекундная характеристика с отсечкой позволяет обеспечить большое быстродействие при отключении короткого замыкания, поэтому ее использование целесообразно в аппаратах защиты, имеющих зависимую характеристику. Однако использование этой характеристики требует некоторого усложнения конструкции защитных устройств.

§ 19.3. АМПЕРСЕКУНДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАВКИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

Как указывалось выше, плавкие предохранители и тепловые автоматы, которые применяются для защиты распределительной сети самолета, имеют зависимые характеристики.

Плавкий предохранитель представляет собой наиболее простой неуправляемый автоматический защитный аппарат, прерывающий цепь тока в том случае, если величина последнего превосходит некоторое допустимое значение.

Плавкий предохранитель состоит из корпуса, металлической плавкой вставки и поддерживающего ее контактного устройства. Основным элементом плавкого предохранителя является плавкая вставка. При увеличении тока в цепи, куда подключен плавкий предохранитель, до определенного значения плавкая вставка нагревается до температуры плавления металла, из которого она выполнена, и расплавляется.

Для нахождения аналитического выражения для амперсекундной характеристики плавкой вставки необходимо составить уравнение теплового баланса плавкой вставки. Однако точный учет количества тепла, отводимого от плавкой вставки в окружающую среду, выполнить практически невозможно вследствие зависимости коэффициентов теплоотдачи и теплоемкости от большого числа факторов, изменяющихся в процессе нагрева вставки. Поэтому аналитическое выражение для амперсекундной характеристики плавкой вставки можно найти лишь приближенно, если не учитывать изменение условий теплоотдачи в процессе нагрева. Тем не менее с качественной стороны аналитическое выражение для амперсекундной характеристики плавкой вставки представляет большой интерес.

Приближенное выражение для амперсекундной характеристики плавкой вставки можно получить, если считать, что нагрев ее происходит адиабатически. Обычно нагрев плавкой вставки происходит за короткий промежуток времени; количество тепла, которое отводится от плавкой вставки за счет теплоотдачи, невелико и им можно пренебречь. Для этого случая уравнение теплового баланса плавкой вставки имеет следующий вид:

$$I^2 \cdot R \, dt = cG \, d\tau, \quad (19.1)$$

где c — удельная теплоемкость материала вставки;

G — вес плавкой вставки;

R — сопротивление плавкой вставки.

В свою очередь для R и c можно написать

$$R = \rho \frac{l}{s} = \rho_0 (1 + \alpha\tau) \frac{l}{s}, \quad (19.2)$$

$$c = c_0 (1 + \beta\tau),$$

где ρ_0 — удельное сопротивление материала вставки при $\tau=0$;

τ — превышение температуры плавкой вставки над установившейся температурой при номинальном режиме работы;

l — длина вставки;

s — сечение вставки в мм^2 ;

α — температурный коэффициент сопротивления;

β — температурный коэффициент теплоемкости;

c_0 — удельная теплоемкость материала вставки при $\tau=0$.

Учитывая, кроме того, что

$$G = \gamma sl,$$

где γ — удельный вес материала вставки, уравнение (19.1) можно переписать так:

$$I^2 \rho_0 (1 + \alpha \tau) \frac{t}{s} dt = c_0 (1 + \beta \tau) \gamma s l d\tau \quad (19.3)$$

или после преобразований

$$\frac{I^2 \rho_0}{c_0 \gamma s^2} dt = \frac{1 + \beta \tau}{1 + \alpha \tau} d\tau. \quad (19.4)$$

После интегрирования этого уравнения в пределах изменения τ от $\tau_{\text{нач}}$ до $\tau_{\text{пл}}$, где $\tau_{\text{нач}}$ — начальное превышение температуры плавкой вставки, а $\tau_{\text{пл}}$ — превышение температуры, при котором происходит плавление материала плавкой вставки, можно найти время нагрева плавкой вставки до превышения температуры $\tau_{\text{пл}}$, при котором наступает плавление:

$$t_{\text{пл}} = \frac{c_0 \gamma s^2}{\alpha \rho_0 I^2} \left[\left(1 - \frac{\beta}{\alpha} \right) \ln \frac{1 + \alpha \tau_{\text{пл}}}{1 + \alpha \tau_{\text{нач}}} + \beta (\tau_{\text{пл}} - \tau_{\text{нач}}) \right]. \quad (19.5)$$

Время перегорания плавкой вставки будет несколько больше этого времени, вследствие того что на расплавление плавкой вставки требуется некоторое количество скрытой теплоты плавления. Если это дополнительное время учесть коэффициентом $\eta > 1$ и обозначить

$$A = \eta \frac{c_0 \gamma}{\alpha \rho_0} \left[\left(1 - \frac{\beta}{\alpha} \right) \ln \frac{1 + \alpha \tau_{\text{пл}}}{1 + \alpha \tau_{\text{нач}}} + \beta (\tau_{\text{пл}} - \tau_{\text{нач}}) \right], \quad (19.6)$$

то для амперсекундной характеристики плавкой вставки получается

$$t = A \left(\frac{s}{I} \right)^2 = \frac{A}{j^2}, \quad (19.7)$$

где j — плотность тока.

Следует подчеркнуть, что эта формула справедлива для небольших промежутков времени нагрева плавкой вставки, так как теплоотдача при выводе этой формулы не учитывалась. Быстрый нагрев плавкой вставки происходит при прохождении через нее токов короткого замыкания, поэтому эта формула и применима для ориентировочного расчета времени перегорания плавкой вставки при коротких замыканиях. При перегрузках, когда ток, проходящий через плавкую вставку, незначительно превышает номинальный ток нагрузки, время перегорания плавкой вставки возрастает. При некотором значении тока, несколько превышающем номинальный ток нагрузки, время перегорания плавкой вставки становится равным бесконечности, т. е. она не перегорает.

На фиг. 19.3 изображены амперсекундные характеристики для двух различных плавких вставок 1 и 2. Из этих характеристик видно, что если ток в цепи $I_{\text{вст}}$ больше величины $I_{\text{вст}2}$, то перегореть должны обе плавкие вставки. Однако время перегорания плавких вставок 1 и 2 при этом неодинаково, плавкая вставка 2 перегорит спустя более продолжительное время, чем плавкая вставка 1 (т. е. $t_2 > t_1$).

Это обстоятельство используется для обеспечения селективной работы плавких предохранителей.

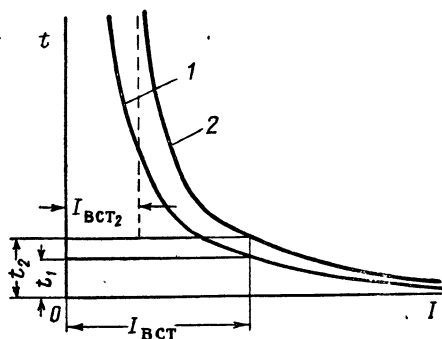
При больших токах короткого замыкания разница во временах перегорания плавких вставок становится очень небольшой (см. фиг. 19.3), поэтому здесь обеспечить селективную работу плавких вставок не удастся.

На самолете много электрических установок, допускающих значительную кратковременную перегрузку. Например, пусковые токи электродвигателей могут достигать $(2.5 \div 8) I_{\text{ном}}$. Очевидно, если использовать обычные плавкие вставки, то они не смогут обеспечить защиту таких электроустановок.

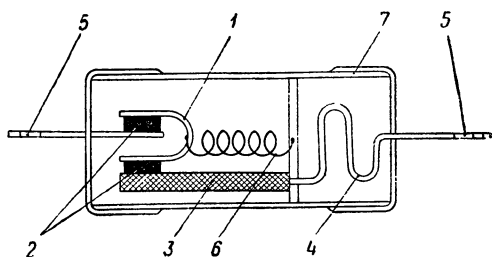
В самом деле, если в цепи двигателя установить плавкую вставку, рассчитанную на его номинальный ток, то она перегорит при запуске двигателя. Если установить плавкую вставку, рассчитанную на пусковой ток двигателя, то она не будет защищать двигатель от недопустимых длительных перегрузок. В настоящее время разработаны инерционные плавкие предохранители, позволяющие осуществлять запуск двигателя, но в то же время защищающие его от перегрузки.

Плавкая вставка таких предохранителей состоит из двух частей (фиг. 19.4). Первая часть плавкой вставки 4 выполнена из латуни и рассчитана на плавление при большом токе, превышающем пусковой ток двигателя. Вторая часть плавкой вставки выполнена из медной полоски 1, припаянной к массивной медной пластинке 3.

Специальная пружина 6, работающая на растяжение, стремится оторвать вставку из тонкой полоски



Фиг. 19.3. Амперсекундные характеристики плавких вставок.



Фиг. 19.4. Инерционный предохранитель.

1—медная полоска, 2—припой, 3—медная пластинка, 4—обычная вставка, 5—токоподводящие шинки, 6—пружина, 7—корпус.

меди от массивной медной пластинки. В результате этого на места припоя 2 медной пластинки 3 к медной полоске 1 действует постоянная механическая сила растяжения пружины. В случае если через инерционный предохранитель протекает большой ток короткого замыкания, латунная вставка 4 мгновенно перегорает; при этом массивная медная пластинка 3 не успевает нагреться до температуры плавления припоя, скрепляющего с ней медную полоску 1. В случае когда через предохранитель протекает длительный перегрузочный ток, недостаточный для перегорания латунной вставки 4, медная пластинка 3 через некоторый промежуток времени нагревается, припой ослабевает и пружина отрывает вставку 1 из тонкой полоски меди от массивной медной пластинки 3, прерывая цепь тока. Амперсекундная характеристика инерционного предохранителя состоит из двух участков (кривая 1 на фиг. 19.5). Первый участок амперсекундной характеристики, соответствующий относительно небольшим токам, является амперсекундной характеристикой инерционной части предохранителя и определяется в основном постоянной времени нагрева массивной медной пластинки 3. Второй участок амперсекундной характеристики соответствует большим токам короткого замыкания, при которых перегорает латунная плавкая вставка 4 (фиг. 19.4).

Для сравнения на фиг. 19.5 приведена амперсекундная характеристика обычного, не инерционного предохранителя (серии СП) на такой же номинальный ток (кривая 2).

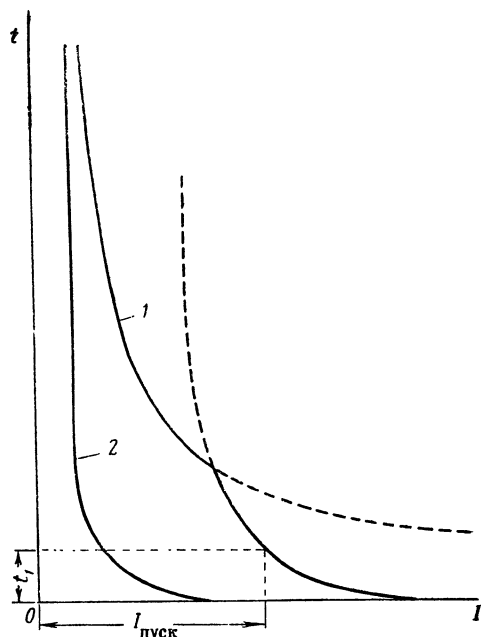
Характеристики плавких вставок очень неустойчивы.

Опыт показывает, что время перегорания плавких вставок сильно зависит от состояния контактов предохранителя и самой плавкой вставки. Если контактные поверхности плохо пригнаны и сильно окислены, кон-

тактные болты плохо завернуты, то вследствие появления переходного сопротивления контакты нагреваются, а вместе с ними нагревается сама плавкая вставка. В этом случае плавкая вставка может перегореть даже при токе, меньшем номинальной величины тока нагрузки.

Чрезвычайно большое влияние на работу плавких вставок имеет температура окружающей среды. При пониженной температуре окружающей среды плавкая вставка может не перегореть даже при таких больших токах перегрузки, которые приведут к порче защищаемого плавкой вставкой агрегата. Это является весьма существенным недостатком плавких вставок, которые на самолете должны работать в очень широком диапазоне изменения температуры окружающей среды.

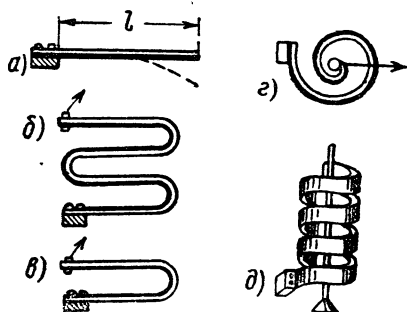
К недостаткам плавких вставок относится также необходимость их смены после перегорания; это в условиях полета в ряде случаев представляет очень большие трудности.



Фиг. 19.5. Амперсекундные характеристики инерционного (1) и тугоплавкого (2) предохранителей.

§ 19.4. АМПЕРСЕКУНДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ САМОЛЕТНЫХ ТЕПЛОВЫХ АВТОМАТОВ ЗАЩИТЫ

Среди самолетной защитной электрической аппаратуры широкое распространение получили тепловые автоматы защиты, в основу принципа действия которых положен изгиб биметаллических элементов при их нагревании.



Фиг. 19.6. Типичные формы биметаллических элементов.

Биметаллический элемент выполняется из двух сваренных или склепанных друг с другом металлических пластинок с различными температурными коэффициентами линейного расширения. Форма биметаллических элементов может быть самой разнообразной. На фиг. 19.6 изображены наиболее типичные формы биметаллических элементов.

При нагревании таких биметаллических элементов компонента, имеющая больший коэффициент линейного расширения, удлиняется на большую величину и деформирует весь элемент. Например, если верхняя пластинка биметаллического элемента, изображенного на фиг. 19.6, а, имеет больший коэффициент линейного расширения, чем нижняя, то она удлинится на большую величину и изогнет весь элемент вниз.

В качестве материала пластинки, имеющей небольшой коэффициент линейного расширения (термоинертная компонента), обычно используют-

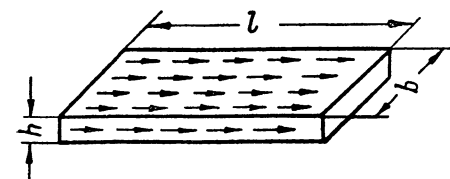
ся инвар и платинит; в качестве материала пластинки, имеющей большой коэффициент линейного расширения,—немагнитная сталь, никель, латунь, константан и другие сплавы.

При определении амперсекундных характеристик тепловых автоматов защиты делается ряд допущений, позволяющих получить достаточно простое аналитическое выражение для этих характеристик. Попытки найти аналитические выражения для амперсекундных характеристик, не делая этих допущений, приводят к настолько сложным аналитическим зависимостям, что сводят на нет их практическую ценность. Практика показывает, что расчетные данные, полученные при использовании аналитических выражений для амперсекундных характеристик, отлича-

ются от экспериментальных не более чем на 15—20%.

При выводе уравнений амперсекундных характеристик принимаются следующие допущения.

1. Нагрев биметаллического чувствительного элемента теплового автомата защиты принимается равномерным. Это допущение практически близко к истине при больших



Фиг. 19.7. Биметаллический элемент в виде пластинки.

токах, нагревающих биметаллический элемент (выше 3—4-кратного значения номинального тока), так как в этом случае более интенсивная теплоотдача от краев биметаллического элемента не успевает влиять на его нагрев за время срабатывания теплового автомата. При меньших кратностях тока перегрузки улучшенная теплоотдача от краев частично компенсируется дополнительным подогревом биметаллического элемента у краев за счет увеличенного переходного сопротивления в месте контакта (при непосредственном нагреве биметаллического элемента).

2. Удельные сопротивление и теплоемкость биметаллического элемента принимаются постоянными, не зависящими от температуры его нагрева. Допущение это можно сделать на том основании, что хотя удельное сопротивление и удельная теплоемкость и растут с увеличением температуры элемента, однако их одновременный рост оказывает взаимно компенсирующее влияние (при непосредственном подогреве) на нагрев биметаллического элемента.

3. Не учитывается влияние кожуха автомата, играющего роль некоторой дополнительной тепловой изоляции для биметаллического элемента, что должно привести к получению несколько больших величин времени срабатывания, чем в действительности. Однако при кратностях тока перегрузки 2—2,5 и выше, как показывает эксперимент, такое допущение очень близко к действительности.

С учетом приведенных выше допущений дифференциальное уравнение нагрева биметаллического элемента, имеющего форму пластинки (фиг. 19.7), принимает вид:

$$I^2 \rho \frac{l}{bh} dt = 2kl(b+h)\tau dt + clhb\gamma d\tau, \quad (19.8)$$

где I — ток перегрузки;

ρ — удельное сопротивление материала биметалла;

l, b, h — геометрические размеры биметаллической пластинки (фиг. 19.7);

k — удельная теплоотдача с поверхности (теплоотдачей с торцов пренебрегают) в $\text{вт/мм}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$;

c — удельная весовая теплоемкость в $\text{джоуль/г } ^\circ\text{C}$;

γ — удельный вес в г/мм^3 .

Величины ρ, c и γ принимаются усредненными для всего биметалла.

Приведенное выше дифференциальное уравнение при начальных условиях, $t=0$; $\tau=\tau_0$, имеет решение

$$\tau = \tau_0 e^{-\frac{t}{T}} + \tau_{\max} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right), \quad (19.9)$$

где $T = \frac{c\gamma b h}{2k(b+h)}$ — постоянная времени нагрева биметалла;

$\tau_{\max} = \frac{I^2 \rho}{2k b h (b+h)}$ — установившееся превышение температуры биметалла.

Начальная температура ϑ_0 соответствует такому состоянию биметалла, при котором он не развивает никаких усилий, и деформация его равна нулю.

Пусть $\tau_{сраб0}$ является таким превышением температуры, при котором биметаллический элемент, нагретый от температуры ϑ_0 до $\tau_{сраб0} + \vartheta_0 = \vartheta_{сраб0}$, развивает усилие, необходимое для совершения хода и создания в конце хода силы F , обеспечивающих срабатывание теплового автомата.

Величины ϑ_0 и $\tau_{сраб0}$ для данного биметаллического элемента являются постоянными, определяемыми геометрией механизма автомата и величиной усилия спускового устройства.

Но если $\vartheta_0 = \text{const}$ и $\tau_{сраб0} = \text{const}$, то и $\vartheta_{сраб0} = \text{const}$ независимо от внешних условий. Следовательно, до какой бы температуры предварительно ни нагревался биметаллический элемент, срабатывание автомата произойдет лишь при достижении биметаллическим элементом температуры $\vartheta_{сраб0}$. Обозначив через $\vartheta_{окр}$ температуру окружающей среды, можно написать

$$\vartheta_{сраб0} = \vartheta_{окр} + \tau_{сраб0} = \vartheta_0 + \tau_{сраб0} = \text{const}.$$

Если температура окружающей среды во все время работы биметаллического элемента остается постоянной, то из последнего соотношения следует, что и превышение температуры срабатывания $\tau_{сраб}$ тоже остается постоянным, т. е. срабатывание теплового автомата будет происходить при строго определенном перегреве биметаллического элемента. Таким образом, амперсекундные характеристики теплового автомата, представляющие собой зависимость времени срабатывания от тока перегрузки, являются изотермическими кривыми.

Амперсекундные характеристики теплового автомата могут быть найдены по уравнению (19.9), из которого

$$\tau_{сраб} = x I_{\text{прогр}}^2 e^{-\frac{t_{сраб}}{T}} + x I_x^2 \left(1 - e^{-\frac{t_{сраб}}{T}}\right), \quad (19.10)$$

где

$$x = \frac{\rho}{2k b h (b+h)},$$

$I_{\text{прогр}}$ — ток предварительного прогрева;

I_x — ток, проходящий через автомат (и достаточный для его срабатывания);

$t_{сраб}$ — время срабатывания автомата.

С другой стороны,

$$\tau_{сраб} = x I_{\text{прогр}}^2 e^{-\frac{t}{T}} + x I_{\text{трог}}^2 \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) = x I_{\text{трог}}^2, \quad (19.11)$$

где $I_{\text{трог}}$ — ток, обеспечивающий $\tau_{сраб}$ при длительном протекании.

Приравнявая (19.10) и (19.11) и решая относительно $t_{сраб}$, имеют

$$e^{-\frac{t_{сраб}}{T}} = \frac{I_x^2 - I_{\text{трог}}^2}{I_x^2 - I_{\text{прогр}}^2};$$

отсюда

$$t_{сраб} = T \ln \frac{I_x^2 - I_{прогр}^2}{I_x^2 - I_{трог}^2}. \quad (19.12)$$

Последнее выражение можно преобразовать, введя обозначения:

$$\frac{I_x}{I_{ном}} = x \text{ — кратность тока, протекающего через автомат;}$$

$$\frac{I_{трог}}{I_{ном}} = x_{трог} \text{ — кратность тока трогания;}$$

$$\frac{I_{прогр}}{I_{ном}} = \beta \text{ — кратность тока прогрева;}$$

$$I_{ном} \text{ — номинальный ток автомата;}$$

$$t_{сраб} = T \ln \frac{x^2 - \beta^2}{x^2 - x_{трог}^2}. \quad (19.13)$$

Последнее выражение и представляет собой амперсекундную характеристику предварительно прогретого током $I_{прогр}$ теплового автомата защиты.

На фиг. 19.8 изображена амперсекундная характеристика теплового автомата защиты при предварительно прогретом состоянии (кривая 1).

Для определения амперсекундной характеристики теплового автомата защиты из предварительно холодного (не прогретого) состояния достаточно положить в уравнении (19.13) $\beta = 0$ ($I_{прогр} = 0$).

$$t_{сраб}^{хол} = T \ln \frac{x^2}{x^2 - x_{трог}^2}. \quad (19.14)$$

На фиг. 19.8 изображена также амперсекундная характеристика теплового автомата защиты при предварительно не нагретом состоянии (кривая 2).

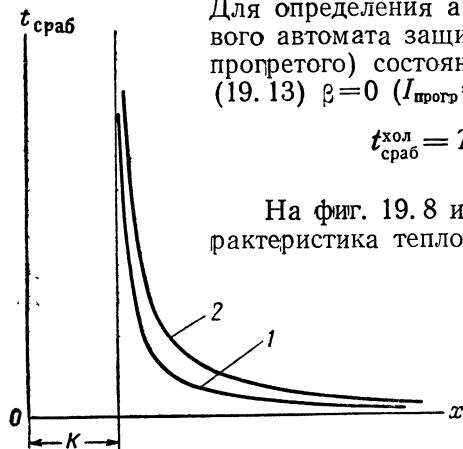
Сравнивая уравнения амперсекундных характеристик теплового автомата защиты при предварительно горячем и холодном состояниях, можно сделать следующие выводы:

1) Амперсекундные характеристики тепловых автоматов защиты при предварительно холодном и предварительно горячем состояниях имеют одни и те же асимптоты.

2) На величину времени срабатывания тепловых автоматов защиты влияют постоянная времени биметалла T конструктивный параметр, зависящий от геометрических размеров биметалла, удельной теплоемкости и условий охлаждения, регулировочный параметр $x_{трог}$, который при неизменной температуре окружающей среды зависит от регулировки автомата, и перегрузочный коэффициент x , т. е. кратность тока перегрузки.

3) Если два автомата построены на один и тот же ток трогания, то ординаты их амперсекундных характеристик относятся друг к другу как постоянные времени (при одних и тех же внешних условиях):

$$\frac{t_{сраб1}}{t_{сраб2}} = \frac{T_1}{T_2}.$$



Фиг. 19.8. Амперсекундные характеристики теплового автомата защиты для предварительно холодного (2) и горячего (1) состояний.

Большой интерес представляет зависимость времени срабатывания от тока короткого замыкания для больших величин токов короткого замыкания.

Выражение для амперсекундной характеристики в этом случае можно значительно упростить, если принять, что нагрев биметалла происходит адиабатически, т. е. если пренебречь отдачей тепла за время нагрева биметалла большим током короткого замыкания.

Дифференциальное уравнение нагрева в этом случае принимает вид

$$I_{xp}^2 \frac{1}{bh} dt = clbh\gamma d\tau. \quad (19.15)$$

Интегрируя в пределах от $\tau=0$ до $\tau_{ср}$, получают

$$t_{ср} = \frac{c\gamma b^2 h^2}{\rho I^2} \tau_{ср} = \frac{c\gamma b h l}{R I_x^2} \tau_{ср}. \quad (19.16)$$

Величина $\tau_{ср}$ известна, если известен ток трогания $I_{тр}$ при $t=\infty$:

$$\tau_{i=\infty} = \frac{I_{тр}^2 \rho}{2k b h (b+h)} = \frac{I_{тр}^2 R}{2kl(b+h)}. \quad (19.17)$$

Подставляя в формулу (19.17) $I_{тр} = x_{тр} I_{ном}$, имеют

$$\tau_{i=\infty} = \frac{x_{тр}^2 I_{ном}^2 R}{2kl(b+h)}.$$

Подставляя это выражение в выражение (19.16) и имея в виду, что $I_x = x I_{ном}$, получают

$$t_{ср} = T \frac{x_{тр}^2}{x^2}, \quad (19.18)$$

где $T = \frac{c\gamma b h}{2k(b+h)}$ — постоянная времени нагрева биметалла.

§ 19.5. ЗАЩИТА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ С ПОМОЩЬЮ ПЛАВКИХ ВСТАВОК И ТЕПЛОВЫХ АВТОМАТОВ

Защита фидерных линий, идущих к отдельным потребителям на самолете, плавкими предохранителями и тепловыми автоматами должна обеспечить отключение фидера потребителя в том случае, если через него протекает ток короткого замыкания или недопустимый ток перегрузки. Первую задачу, т. е. отключение места короткого замыкания, можно решить с помощью плавких предохранителей и тепловых автоматов более просто, чем вторую.

Если известен номинальный ток нагрузки потребителя $I_{ном}$, то для защиты потребителя от коротких замыканий достаточно взять ток срабатывания защиты на некоторый коэффициент запаса большим номинального тока нагрузки (практически подбирается ближайший больший по номинальному току предохранитель или автомат, что определяет величину коэффициента запаса):

$$I_{защит} = k_3 I_{ном} \geq I_{ном}, \quad (19.19)$$

где $I_{защит}$ — номинальный ток защиты плавкого предохранителя или теплового автомата;

k_3 — коэффициент запаса.

Такой выбор защитного аппарата может быть произведен лишь в том случае, если ток нагрузки потребителя при всех режимах его ра-

боты не превышает номинальной величины. Однако на самолете имеется много потребителей, которые в некоторых режимах работы могут потреблять токи, значительно превосходящие номинальный ток нагрузки. Например, пусковые токи самолетных двигателей постоянного тока могут достигать 2,5—8-кратного значения от номинального тока. Это может привести к тому, что при недостаточно большом коэффициенте запаса k_z при пуске двигателя предохранитель перегорит, а тепловой автомат защиты отключит двигатель от сети. Опыт показывает, что, учитывая кратковременный характер пусковых токов, предохранитель для двигателей можно выбирать на ток, в полтора раза меньший пускового тока, т. е.

$$I_{\text{защит}} \geq \frac{I_{\text{пуск}}}{1,5}. \quad (19.20)$$

Коэффициент запаса при этом значительно больше единицы. Но при таком большом номинальном токе предохранителя двигатель не будет защищен от перегрузок, так как через двигатель может протекать длительно ток, значительно превосходящий номинальный ток нагрузки, не вызывая перегорания предохранителя.

Одновременная защита от токов перегрузки и токов короткого замыкания требует применения специальных инерционных аппаратов защиты, способных не реагировать на большие броски тока кратковременного характера, но отключать нагрузку от сети при протекании через них значительно меньших установившихся токов. К таким инерционным аппаратам защиты относятся инерционные плавкие предохранители, описанные выше, и тепловые автоматы защиты.

На фиг. 19.5 изображены амперсекундные характеристики простого (тугоплавкого) 2 и инерционного 1 плавких предохранителей на один и тот же номинальный ток.

Нетрудно видеть, что при протекании через предохранитель пускового тока предохранитель 2 перегорит практически мгновенно, в то время как для перегорания инерционного предохранителя требуется некоторое время t_1 . Если это время t_1 больше длительности протекания пускового тока, то предохранитель 1 не успеет перегореть и двигатель отключен от сети не будет. При протекании тока короткого замыкания оба предохранителя, как нетрудно видеть из фиг. 19.5, перегорают практически мгновенно.

При защите двигателей инерционными предохранителями следует выбирать ближайший больший предохранитель по номинальному току двигателя.

Плавкие предохранители просты в производстве и имеют небольшие вес и габариты. Поэтому они нашли широкое применение для защиты распределительных самолетных сетей. Однако плавкие предохранители имеют недостатки, основными из которых являются: необходимость замены перегоревших плавких вставок, невозможность визуального контроля за состоянием предохранителей и непостоянство их характеристик. Поэтому в настоящее время они все больше вытесняются тепловыми автоматами.

Тепловые автоматы относятся к инерционным аппаратам защиты и защищают фидер от коротких замыканий и перегрузочных токов. Если тепловой автомат предназначен для защиты распределительного фидера со спокойным продолжительным режимом работы, то он выбирается по номинальному току нагрузки потребителя (берется автомат на ближайший больший ток по шкале номинальных токов автоматов). Выбор тепловых автоматов для потребителей, допускающих пусковые токи, токи реверса и толчки нагрузки, производится по амперсекундным характеристикам. Для этого подсчитывается максимально возможное эффективное

значение тока нагрузки за время ее изменения, например, за время пуска двигателя по формуле

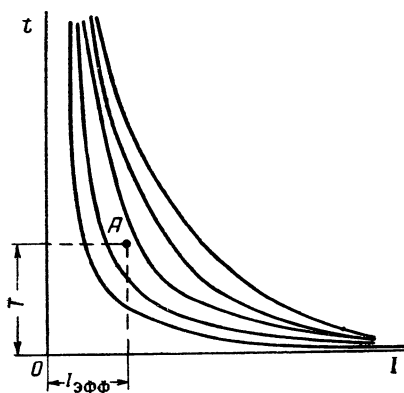
$$I_{\text{эфф}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}, \quad (19.21)$$

где i — мгновенное значение тока нагрузки за период кратковременной перегрузки;

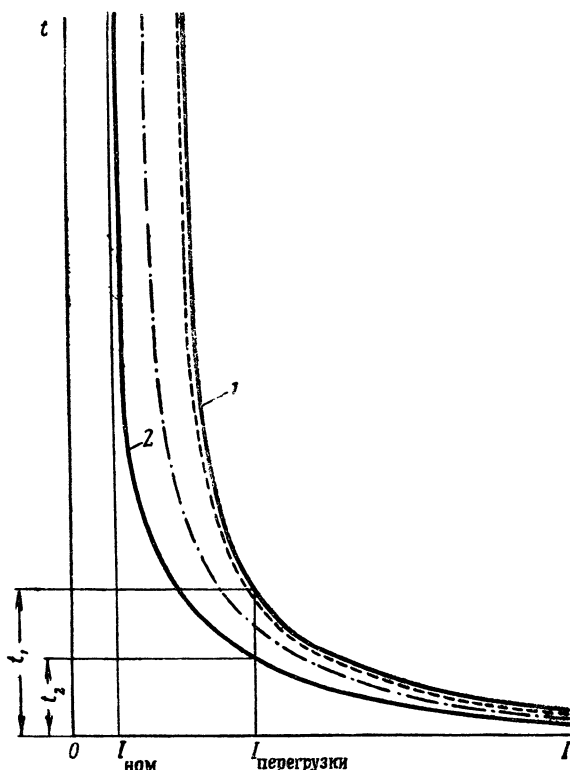
T — продолжительность кратковременной перегрузки.

После этого на семейство амперсекундных характеристик, предполагаемых к использованию тепловых автоматов, построенное для различных номинальных величин токов автоматов, наносится точка с координатами $I_{\text{эфф}}, T$ (фиг. 19.9, точка A). Ближайшая к точке A амперсекундная характеристика, проходящая выше этой точки, соответствует тому автомату, который следует выбирать. Величину интеграла (19.21) легко определить графически по известной кривой $i=f(t)$.

Защита распределительного фидера от перегрузочных токов в таком виде, как это указано выше, по существу не является защитой от перегрузки потребителя.



Фиг. 19.9. К выбору теплового автомата защиты для кратковременной перегрузки.



Фиг. 19.10. Зависимость времени нагрева изоляции до допустимой величины от тока нагрузки для наземных (1) и высотных (2) условий.

Величиной, ограничивающей перегрузку потребителя, является, как правило, не величина тока перегрузки, а нагрев изоляции токонесущих частей в потребителе (обмоток, катушек, коллекторов и т. д.).

Величина тока перегрузки не отражает и не может отражать степень нагрева изоляции потребителя.

Условия охлаждения потребителей электрической энергии меняются на самолете в очень широких пределах. Один и тот же ток перегрузки может в одном случае привести к недопустимому перегреву изоляции потребителя, а в другом случае нагрев изоляции может быть меньше допустимой величины. На фиг. 19.10 изображена зависимость времени нагрева изоляции потребителя на самолете до допустимой вели-

чины от тока нагрузки для наземных условий (полет на небольшой высоте — кривая 1) и для условий высотного полета (кривая 2).

Из этих кривых видно, что для данного тока перегрузки и при полете на небольшой высоте время нагрева изоляции до допустимой величины равно t_1 , а для того же тока перегрузки, но при полете на большой высоте это время t_2 значительно меньше времени t_1 . Значит, ток перегрузки не может являться критерием действительной перегрузки потребителя, определяемой величиной нагрева изоляции за время существования тока перегрузки.

Чтобы обеспечить защиту потребителя от перегрузки, необходимо иметь такую амперсекундную характеристику защитного аппарата, которая была бы совершенно подобна зависимости времени нагрева изоляции потребителя до допустимой величины от тока нагрузки и проходила немного ниже последней. Однако этого мало. Необходимо еще обеспечить непрерывное перемещение (слежение), амперсекундной характеристики защитного аппарата за кривой зависимости времени нагрева потребителя от тока нагрузки при изменении условий охлаждения потребителя (допустим, из-за изменения высоты полета).

Для обеспечения этого защитный аппарат должен быть тепловой моделью защищаемого им потребителя, т. е. условия нагрева и охлаждения защитного аппарата должны быть такими же, как условия нагрева и охлаждения потребителя, и постоянная времени нагрева защитного аппарата должна быть равна постоянной времени нагрева потребителя.

На практике достигнуть этого не представляется возможным, так как условия охлаждения потребителя (например, обмотки якоря двигателя) меняются с изменением высоты полета, как правило, не в такой же степени, в какой меняются условия охлаждения защитного аппарата. Так, если защищаемый объект находится вне герметической кабины, а защитный аппарат в герметической кабине, то амперсекундная характеристика защищаемого объекта в большей степени изменяется при изменении высоты полета, чем амперсекундная характеристика защитного аппарата. Поэтому если выбрать амперсекундную характеристику плавкого предохранителя или теплового автомата так, чтобы она допускала максимальное использование перегрузочной способности потребителя на небольшой высоте полета (см. фиг. 19.10), то на большой высоте полета защита потребителя от перегрузки не будет обеспечиваться. Это произойдет потому, что амперсекундная характеристика защитного аппарата (штрих-пунктир на фиг. 19.10) будет расположена выше соответствующей зависимости времени нагрева изоляции потребителя до допустимой величины от тока нагрузки.

Наиболее рациональной защитой от перегрузок должна быть такая защита, которая могла бы реагировать непосредственно на нагрев изоляции потребителя. Такая защита называется «встроенной». Теплочувствительный элемент встроенной защиты располагается в непосредственной близости к наиболее нагретой части потребителя, ограничивающей его перегрузочную способность (например, у коллектора двигателя), и нагревается непосредственно теплом, отводимым от этой нагретой части. Когда нагрев потребителя доходит до недопустимой величины, температура теплочувствительного элемента достигает температуры срабатывания и потребитель отключается от сети. Очевидно, что встроенная защита позволяет наиболее полно использовать перегрузочную способность потребителя. В качестве чувствительных элементов встроенной защиты могут быть использованы датчики из металлической проволоки, увеличивающей сопротивление при нагреве, биметаллические элементы и пр. Применяются также датчики, построенные на термосопротивлениях.

Термосопротивления представляют собой специальные сопротивления, изготовленные из полупроводниковых материалов и обладающие большим температурным коэффициентом сопротивления. В то время как у металлов температурный коэффициент сопротивления положительный и составляет 0,4—0,5% на 1° С, у термосопротивлений этот коэффициент отрицательный и составляет 3—4% на 1° С (при небольших изменениях температуры). Благодаря малым габаритам термосопротивления без труда могут быть встроены в любой конструктивный узел электрической машины.

Встроенная защита позволяет защитить потребитель от перегрузок, но не может обеспечить защиту потребителя от коротких замыканий. При коротком замыкании нагрев изоляции потребителя током короткого замыкания происходит очень быстро, а вследствие неизбежной инерционности тепловувствительный элемент встроенной защиты не может сразу реагировать на очень быстрый нагрев потребителя. Поэтому встроенная защита должна обязательно дополняться защитой от коротких замыканий.

Установка встроенной защиты на самолетах не всегда оказывается целесообразной, поэтому часто ограничиваются лишь той защитой от токов перегрузки, которую позволяют осуществить плавкие предохранители и тепловые автоматы. Поэтому наиболее распространенной защитой распределительной сети самолетов является защита с помощью плавких предохранителей и тепловых автоматов.

§ 19.6. ЗАЩИТА ПИТАТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ САМОЛЕТА ПЛАВКИМИ ПРЕДОХРАНИТЕЛЯМИ И ТЕПЛОВЫМИ АВТОМАТАМИ

Защита питательной электрической сети самолета служит для обеспечения работоспособности потребителей электрической энергии и увеличения живучести всей системы передачи и распределения электрической энергии на самолете в случае повреждения того или иного участка питательной сети или при отказе защиты в распределительной сети.

Как видно, на защиту питательной электрической сети возлагаются весьма ответственные функции.

При отсутствии защиты питательной сети всякое глухое короткое замыкание в отдельных ее участках может привести к выходу из строя всей сети и, следовательно, к нарушению энергоснабжения всех потребителей электрической энергии. С помощью защиты питательной электрической сети отключаются поврежденные участки ее, что дает возможность использовать оставшуюся часть питательной сети для передачи и распределения электрической энергии на самолете.

Средства и методы защиты питательной сети самолета зависят от ее типа, степени разветвления, характера потребителей и т. д.

Если питательная сеть незамкнутая (радиальная) и не сильно разветвлена, то защита питательной сети может быть построена на максимально токовом принципе. В этом случае в качестве защитной аппаратуры могут быть использованы защитные устройства, реагирующие на превышение тока, проходящего через них, над номинальным значением.

Для защиты радиальных самолетных питательных сетей применяются плавкие предохранители и тепловые автоматы. Чтобы защита питательной сети не срабатывала при коротких замыканиях в распределительной сети, необходимо, как об этом указывалось выше, обеспечить селективное ее действие.

Селективность действия защиты можно обеспечить соответствующим подбором амперсекундных характеристик защитной аппаратуры. При

этом номинальный ток аппаратуры защиты должен изменяться по восходящей линии от потребителей электрической энергии к генераторам.

Такой способ обеспечения селективности действия защиты имеет существенные недостатки. Из амперсекундных характеристик плавких предохранителей и тепловых автоматов (см. фиг. 19.5 и 19.9) видно, что при больших кратностях тока короткого замыкания время срабатывания защиты становится очень малым и все амперсекундные характеристики сходятся к оси абсцисс. Вследствие этого при больших токах короткого замыкания возможна неправильная, ложная работа защиты, вероятность которой возрастает, если учесть к тому же нестабильность самих характеристик аппаратуры защиты, особенно плавких предохранителей.

Поэтому, если есть возможность, для увеличения надежности селективной работы защиты следует последовательно включенную в питающую сеть аппаратуру защиты подбирать так, чтобы соседние аппараты защиты отличались друг от друга не менее чем на две ступени шкалы номинальных токов данной защитной аппаратуры.

При подборе защитной аппаратуры в питательных участках радиальной сети следует исходить из максимально возможной величины рабочего тока через этот участок. Максимально возможной величиной рабочего тока в этом случае является сумма номинальных величин токов одновременно работающих потребителей, питание которых осуществляется через защитный аппарат этого участка питающей сети. Поэтому в большинстве случаев защитный аппарат в питающей сети приходится выбирать по току, значительно превосходящему номинальные токи отдельных потребителей, и требование селективности действия защиты выполняется автоматически.

Однако при этом необходимо иметь в виду, что избранная таким образом защита питающей сети может не обладать достаточной инерционностью действия, для того чтобы не отключать потребителей при одновременном запуске нескольких двигателей.

Если через защитный аппарат питающей сети питается несколько двигателей, то после кратковременного понижения напряжения в сети, вызванного теми или иными причинами, и последующего быстрого его восстановления все двигатели могут оказаться в пусковом режиме.

Защита каждого двигателя рассчитана на пусковые токи и не отключит двигатель, защита же в питающей сети, через которую протекает сумма всех пусковых токов, может при этом сработать и выключить все потребители. Это осложняет выбор аппаратуры защиты для питающей сети.

При использовании максимально-токовой защиты для самолетных замкнутых питающих сетей обеспечить полностью селективность действия защиты не удается.

На фиг. 19.11 изображена самолетная замкнутая питающая сеть с защитой на плавких предохранителях. Если в такой сети выбрать предохранители по нисходящей линии от генератора, т. е.

$$I_{\text{предохр. 1}} > I_{\text{предохр. 2}} > I_{\text{предохр. 3}} > I_{\text{предохр. 4}},$$

как это требуется для обеспечения селективности действия защиты, то оказывается, что селективное действие защиты будет обеспечено не во всех случаях.

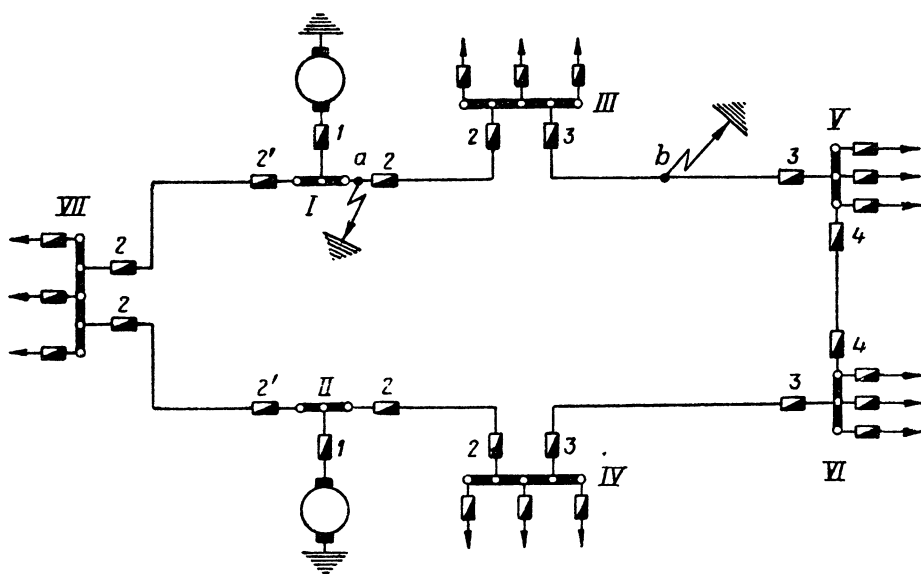
Так, при коротком замыкании в точке *a* должен перегореть предохранитель *1* у первого генератора и могут перегореть, например, предохранители *4* и *2'* у распределительных устройств *VI* и *II*.

При этом на распределительные устройства *III*, *V* и *VII* питание подаваться не будет, в то время как они могли бы получать питание,

если бы перегорели предохранители 2 и 2' у распределительного устройства I. Таким образом, при коротком замыкании в точке *a* защита будет работать неселективно. Неселективно также будет работать защита при коротком замыкании в точке *b*, так как после срабатывания защиты распределительное устройство V лишено питания.

Можно было бы добиться селективной работы максимально-токовой защиты и в замкнутой питательной сети, однако для этого потребовалось бы существенное усложнение (введение направленной защиты), а следовательно, и утяжеление сети, что неприемлемо для самолетных условий.

Таким образом, принцип максимально-токовой защиты не может обеспечить селективную защиту замкнутых самолетных электрических сетей.



Фиг. 19.11. Схема защиты замкнутой питательной сети.

К недостаткам защиты питательной сети с помощью максимально-токовых аппаратов (плавких предохранителей и тепловых автоматов) относится также необходимость иметь большую выдержку времени защиты в головных участках сети, т. е. в участках, смежных с генераторами. Как указывалось выше, для обеспечения селективности действия защиты выдержки времени действия защиты должны возрастать в направлении от потребителей к генераторам. Последнее может привести к затягиванию процесса отключения короткого замыкания в самих головных участках питательной сети, где как раз требуется возможно быстрое отключение короткого замыкания, чтобы уменьшить его последствия.

Наконец, необходимо указать еще на один существенный недостаток защиты питательной сети с помощью максимально-токового принципа. В питательных электрических сетях современных самолетов с высокой степенью электрификации величины токов короткого замыкания, сопровождающегося дугой (так называемые перемежающиеся короткие замыкания), могут быть меньше рабочих токов мощных электромеханизмов. Очевидно, что здесь для правильного отключения таких коротких замыканий максимально-токовый принцип действия защиты оказывается непригодным.

§ 19.7. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ПИТАТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ САМОЛЕТА

Устранить указанные недостатки защиты питательной сети с помощью максимально-токовой аппаратуры можно дополнением этой аппаратуры быстродействующей дифференциально-токовой защитой.

Дифференциально-токовой защитой называется защита, основанная на принципе сравнения токов в начале и в конце защищаемого участка питательной сети или в каких-либо иных двух его точках. Дифференциально-токовая защита может быть продольной и поперечной.

Продольная дифференциально-токовая защита основана на сравнении токов в начале и в конце защищаемого участка линии. Принципиальная схема продольной дифференциально-токовой защиты участка питательной сети постоянного тока изображена на фиг. 19. 12.

В начале и в конце защищаемого участка линии включены одинаковые сопротивления R . Параллельно к этим сопротивлениям подключены две обмотки чувствительного электромагнитного реле P .

Когда ток в линии протекает через оба сопротивления в направлении от генератора (нормальный режим работы или короткое замыкание за защищаемым участком — точка a), то ампервитки электромагнитного реле P равны разности ампервитков, создаваемых первой и второй обмотками:

$$AW_p = AW_1 - AW_2.$$

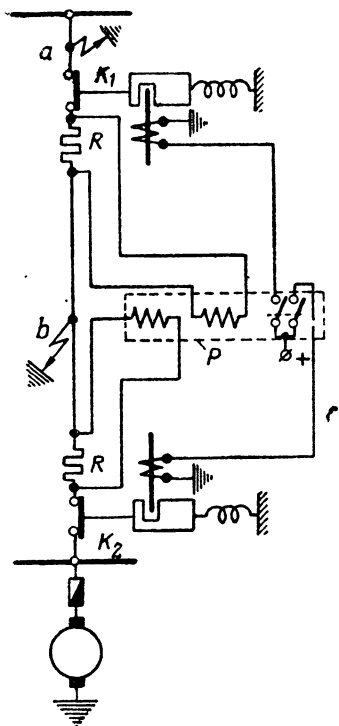
Эта разность при одинаковых параметрах обмоток близка к нулю, и нормально разомкнутые контакты реле P остаются разомкнутыми. Если внутри защищаемого участка линии произойдет короткое замыкание (точка b), то ток через сопротивление R в конце защищаемого участка линии меняет знак (при наличии двухстороннего питания)

Фиг. 19. 12. Принципиальная схема продольной дифференциальной защиты участка питательной сети постоянного тока.

или становится равным нулю (при одностороннем питании). Баланс ампервитков реле P при этом нарушается и оно замыкает свои контакты.

При этом на защелки контакторов K_1 и K_2 подается питание, и контакторы отключают защищаемый участок питательной линии от остальной сети. Для включения участка линии в сеть после устранения повреждения контакторы должны быть снова поставлены на защелки от руки.

Как видно, такая защита по принципу устройства действует только при повреждениях в защищаемой зоне. Поэтому такую защиту можно сделать очень быстродействующей, не опасаясь нарушения селективности действия всей защиты питательной сети в целом. Большим достоинством дифференциальной защиты является также то, что она может быть настроена на ток короткого замыкания, меньший максимального рабочего тока линии (перемежающееся короткое замыкание). Существенным недостатком такой продольной дифференциальной защиты питательной сети является необходимость прокладки вдоль защищаемого участка сети

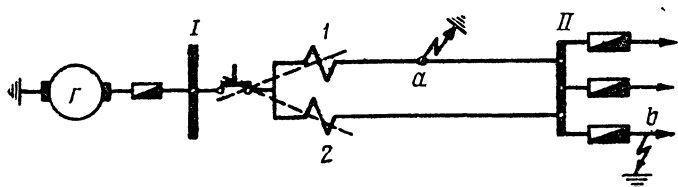


вспомогательных проводов защиты. Помимо увеличения веса сети и эксплуатационных неудобств, это вносит элемент ненадежности, так как обрыв одного из вспомогательных проводов, как нетрудно видеть из схемы на фиг. 19.12, приводит к ложному срабатыванию защиты. Это ограничивает возможности использования продольной дифференциальной защиты для самолетных питательных электрических сетей.

Для самолетных питательных электрических сетей больший интерес представляет поперечная дифференциально-токовая защита.

На фиг. 19.13 изображена схема поперечной дифференциальной защиты участка питательной сети с односторонним питанием.

Для осуществления поперечной дифференциальной защиты участка питательной сети его необходимо выполнить в виде двух параллельных линий, как это изображено на фиг. 19.13. Последовательно в каждый из этих участков у шин источника питания включаются обмотки электромагнитного реле, действующие навстречу друг другу. Нормально замкну-



Фиг. 19.13. Принципиальная схема поперечной дифференциальной защиты линии постоянного тока с односторонним питанием.

тые контакты этого реле включены последовательно в общую цепь участка питательной линии. Так как оба параллельных участка питательной линии совершенно одинаковы и выполнены из провода одного сечения, то в нормальных условиях работы токи через обмотки 1 и 2 электромагнитного реле равны друг другу.

Так как обмотки 1 и 2 имеют одно и то же число витков, то ампервитки, создаваемые ими, также одинаковы, а вследствие того что они действуют навстречу друг другу, результирующий магнитный поток равен нулю.

Чтобы электромагнитное реле сработало и подало импульс на размыкание контактов K , необходимо иметь определенные ампервитки срабатывания $AW_p = AW_{ср}$, которые могут появиться лишь вследствие неравенства токов, протекающих в параллельных линиях:

$$AW_p = w(i_1 - i_2). \quad (19.22)$$

В свою очередь неравенство тока в параллельных линиях может получиться лишь вследствие обрыва одного из параллельных проводов или короткого замыкания в одном из проводов (например, в точке a , фиг. 19.13).

Если короткое замыкание произойдет вне пределов рассматриваемого участка питательной линии (точка b , фиг. 19.13), то дифференциальная защита не сработает, так как ток короткого замыкания распределится поровну между двумя параллельными линиями. Такое короткое замыкание называется сквозным коротким замыканием по отношению к участку питательной линии, оборудованному дифференциальной защитой. Таким образом, поперечная дифференциальная защита обеспечивает селективность работы защиты, когда короткое замыкание происходит вне зоны ее действия и в то же время позволяет практически мгновенно

отключить короткое замыкание в зоне действия защиты, т. е. на питающей линии.

Однако в действительных условиях сопротивления параллельных участков защищаемой питающей линии никогда точно не равны друг другу. Всегда имеется некоторая разница в величинах этих сопротивлений, обусловленная в основном неодинаковыми переходными сопротивлениями контактов в параллельных линиях. Поэтому и токи в параллельных участках должны несколько отличаться друг от друга.

Разность токов параллельных участков, вызванная неравенством их сопротивлений, называется током небаланса дифференциальной защиты. Чтобы защита работала правильно, величина возможных ампервитков небаланса, вызванных наличием тока небаланса, должна быть меньше ампервитков срабатывания электромагнитного реле защиты:

$$i_{нб}w = (i_1 - i_2)w < AW_{срб} = i_{срб}w. \quad (19.23)$$

Очевидно, наибольшей величина тока небаланса будет при сквозных коротких замыканиях. Поэтому ампервитки срабатывания или ток срабатывания (в дальнейшем под током срабатывания подразумевается величина разности токов параллельных участков линии, достаточная для срабатывания защиты) электромагнитного реле защиты должны быть отстроены так, чтобы реле не срабатывало при возможных максимальных значениях сквозных токов короткого замыкания. Это приводит к необходимости «загрублять» дифференциальную защиту, делать ее менее чувствительной к коротким замыканиям в зоне защиты. Последнее вызывает появление значительных мертвых зон действия защиты, т. е. таких участков защищаемой питающей линии, короткое замыкание на которых не приводит к срабатыванию защиты. Если, например, короткое замыкание происходит в конце защищаемого участка линии (см. фиг. 19.13), то разница в сопротивлениях от шины I до места короткого замыкания верхнего и нижнего проводов будет очень небольшой, вследствие чего разность токов в верхнем и нижнем проводах будет меньше тока срабатывания защиты, величина которого взята большей из соображений обеспечения правильного действия защиты при сквозных коротких замыканиях. Указанный недостаток является принципиальным недостатком поперечной дифференциальной защиты, так как если ток срабатывания защиты мал, то при коротких замыканиях в конце линии, вследствие упомянутой неодинаковости сопротивлений параллельных линий разность токов в параллельных ветвях может быть недостаточной для срабатывания защиты.

Учитывая, что повреждения на концах питающих участков самолетной электрической сети (вне зоны защиты) весьма вероятны, следует ожидать большого числа отказов защиты при таких замыканиях.

Поэтому поперечная дифференциальная защита самолетных питающих электрических сетей должна резервироваться максимально-токовой защитой, как это изображено на фиг. 19.13. Такое резервирование необходимо также для селективного отключения сквозных коротких замыканий.

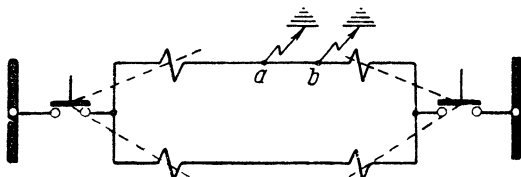
Поперечная дифференциальная защита может быть использована и в замкнутых питающих сетях, в которых питание защищаемого участка питающей сети осуществляется с двух сторон (фиг. 19.14). В этом случае дифференциальное электромагнитное реле должно быть установлено с обоих концов линии. Нетрудно видеть, что и в этом случае будут иметь место мертвые зоны действия защиты.

Если короткое замыкание произойдет в средних участках параллельных линий (точка a на фиг. 19.14), то ток i_p левой и правой защиты

будет достаточным для того, чтобы защиты сработали, и тогда участок питательной сети будет отключен с двух сторон.

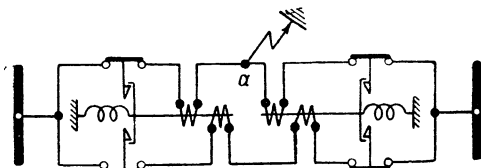
Если короткое замыкание произошло на одной из параллельных линий близко к правому концу (точка b на фиг. 19.14), то ток правой защиты будет большой и она сработает. Ток $i_{р,л}$ левой защиты вследствие небольшой разницы в сопротивлениях верхней и нижней линий будет невелик, и защита может не отключить участок питательной сети с левого конца.

Аналогичная картина может наблюдаться при коротком замыкании у левого конца. В этом случае линия будет отключена левой защитой, правая же защита может не сработать. Таким образом, в этом случае имеются две мертвые зоны защиты, у каждого из концов участка питательной сети. Этот органический недостаток поперечной дифференциальной защиты (наличие мертвых зон) можно устранить некоторым усложнением аппаратуры защиты.



Фиг. 19.14. Принципиальная схема поперечной дифференциальной защиты линии постоянного тока с двухсторонним питанием.

На фиг. 19.15 изображена схема поперечной дифференциальной защиты, предложенная М. Я. Николаевским, при которой мертвые зоны отсутствуют. Как видно, отличие этой схемы от схемы, изображенной на фиг. 19.14, заключается лишь в том, что разрыв цепи тока защитой осуществляется не одной парой контактов, общей для расщепленных участков линий, а одновременно двумя парами контактов, находящихся в каждом из расщепленных участков.



Фиг. 19.15. Принципиальная схема поперечной дифференциальной защиты линии постоянного тока без мертвых зон.

Легко показать, что в этом случае мертвые зоны отсутствуют. В самом деле, пусть короткое замыкание произошло в правом конце линии (точка a). При этом ампервитки левой защиты будут меньше ампервитков срабатывания, а ампервитки правой защиты намного больше ампервитков срабатывания, так как ток в верхней обмотке правого дифференциального реле изменит свой знак. Поэтому левая защита не сработает, а сработает лишь правая защита и отключит оба расщепленных участка линии от сети справа. После этого весь ток короткого замыкания будет протекать через верхний участок расщепленной линии, ампервитки левой защиты резко возрастут, и защита отключит поврежденный участок от сети и слева.

Нетрудно убедиться, что так же защита будет работать и при одностороннем питании. Поэтому для устранения мертвых зон действия поперечной дифференциальной защиты при одностороннем питании необходимо, так же как и при двухстороннем питании, устанавливать два комплекта защиты, в правом и левом концах линии.

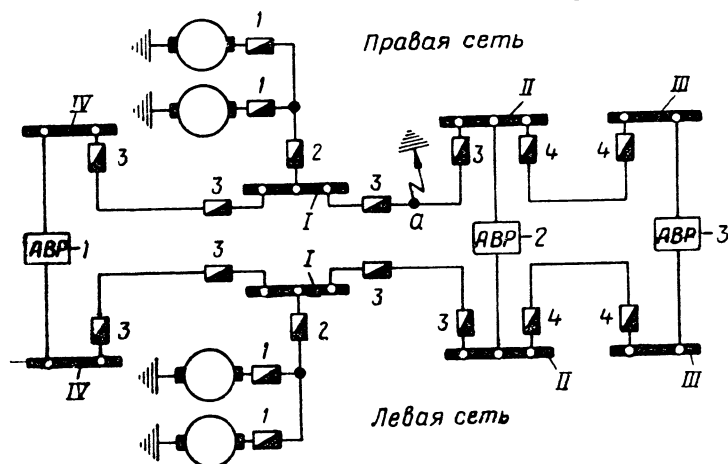
Весьма заманчивым представляется также такое выполнение защиты параллельных линий питательного участка сети, при котором отключалась бы лишь та линия, на которой произошло короткое замыкание. Это повысило бы надежность действия и живучесть питательной сети. Однако для выполнения такой защиты необходимо использование защитной аппаратуры, реагирующей на направление энергии. Но это значительно

усложняет аппаратуру, приводит к увеличению ее веса и габаритов и к уменьшению надежности действия защиты в целом. Поэтому в самолетных условиях применение для защиты питательных участков электрической сети направленной защиты не всегда целесообразно.

§ 19.8. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ САМОЛЕТНЫХ ПИТАТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Помимо радиальных и замкнутых самолетных питательных электрических сетей, в практике могут встретиться так называемые радиальные резервированные самолетные электрические сети.

Радиальная резервированная электрическая сеть представляет собой по существу две или несколько радиальных сетей, работающих от неза-



Фиг. 19.16. Принципиальная схема радиальной резервированной сети.

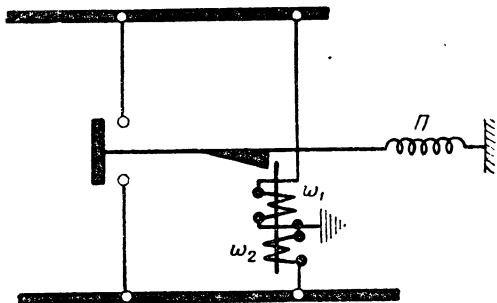
висимых групп источников электрической энергии. В качестве примера на фиг. 19.16 приведена радиальная резервированная питательная сеть с двумя независимыми группами источников электрической энергии.

Питательная электрическая сеть, изображенная на фиг. 19.16, состоит из двух независимо работающих радиальных сетей, одна из которых питается от двух правых генераторов, а другая от двух левых. Пусть вся нагрузка при нормальных режимах работы питается от правой радиальной сети, а левая радиальная сеть является резервной. (Последнее не обязательно, при нормальных режимах работы нагрузка может быть распределена также поровну между правой и левой сетями или каким-либо иным образом.)

Если по каким-либо причинам прекратится питание правой радиальной сети, то к ней должна быть немедленно подключена резервная (левая) радиальная сеть, для того чтобы потребители снова получили питание. Если резервная сеть будет подключена достаточно быстро, то нормальный режим работы потребителей не будет нарушен. Такое быстрое подключение резервной сети к основной можно обеспечить только автоматически. Устройства, с помощью которых осуществляется это автоматическое подключение резервной сети, называется автоматами включения резерва, или сокращенно АВР (на фиг. 19.16 они изображены в виде прямоугольников АВР-1, АВР-2 и АВР-3). Применение в сети не одного, а нескольких АВР диктуется необходимостью обеспечить питание потребителей при наличии короткого замыкания на одном из участков

основной сети. Если, например, в точке *a* правой радиальной сети произошло короткое замыкание, то перегорит предохранитель 3 у щитка *I*, и щитки *II* и *III* будут лишены питания. (Для обеспечения селективности защиты предохранители в сети взяты по нисходящей линии $I_{пр2} > I_{пр3} > I_{пр4}$). Если после этого включится АВР-2 (для этого выдержка времени АВР-2 должна быть несколько меньше выдержки времени АВР-3), то предохранитель 3 у щитка *II* также перегорит, и щитки *II* и *III* будут получать питание от резервной сети. Для возможности автоматического действия АВР должны реагировать на исчезновение напряжения в сети. Одна из возможных принципиальных схем включения АВР изображена на фиг. 19.17.

Обмотки АВР ω_1 и ω_2 включены на напряжения основной и резервной сетей и действуют навстречу друг другу. При нормальном режиме работы результирующие ампервитки АВР невелики и защелка удерживает контакты АВР в разомкнутом состоянии. Если напряжение в основной сети снизилось до определенной величины настройки АВР, то результирующие ампервитки становятся достаточными для освобождения защелки, и контакты АВР замыкаются силой растянутой пружины *П*.



Фиг. 19.17. Принципиальная схема включения АВР.

Если обе радиальные сети в нормальном режиме обеспечивают питание потребителей, то они взаимно резервируют друг друга.

АВР должны быть настроены на определенное напряжение срабатывания и иметь выдержку времени при срабатывании. Напряжение срабатывания АВР должно быть меньше той величины напряжения, до которой оно снижается при наиболее неблагоприятных условиях пуска двигателей, а также меньше остаточного напряжения при коротком замыкании в распределительной сети. В противном случае АВР может сработать при кратковременном снижении напряжения во время пуска двигателей или при коротком замыкании в распределительной сети, которое должно быть отключено своей защитой. Выдержка времени АВР должна быть по возможности небольшой, для того чтобы обеспечить бесперебойное питание потребителей и устранить одновременный самозапуск двигателей. Однако очень малой выдержка времени срабатывания АВР также не может быть взята. Выдержка времени АВР должна быть больше максимальной выдержки времени срабатывания защиты основной радиальной сети. В противном случае АВР может сработать прежде, чем сработает защита питательной сети.

Самолетные радиальные резервированные питательные сети в ряде случаев обладают преимуществами перед замкнутыми. Основным преимуществом является простота выполнения и легкость обеспечения селективного действия защиты в радиальных резервированных сетях.

§ 19.9. ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ САМОЛЕТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

При системе энергоснабжения самолетов на переменном токе для защиты распределительной и питательной сетей может быть использована та же аппаратура, которая применяется для защиты соответствующих сетей на постоянном токе (тепловая и дифференциально-токовая).

Выше указывалось, что использование тепловых автоматов для защиты питательных сетей лимитируется разрывной мощностью их контактов. Предельные величины номинальных токов тепловых автоматов защиты для самолетных цепей постоянного тока лежат в пределах 150—250 а. Так как условия коммутации цепей переменного тока значительно легче условий коммутации цепей постоянного тока, то имеются все основания предполагать, что для защиты самолетных питательных сетей переменного тока тепловые автоматы защиты будут использоваться более широко, чем для защиты сетей постоянного тока. Эти автоматы защиты

должны быть оборудованы дистанционным управлением от оперативной сети постоянного тока.

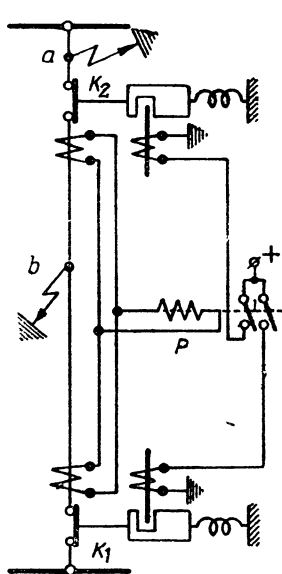
Так же как и для самолетных сетей постоянного тока, для самолетных питательных сетей переменного тока можно использовать дифференциально-токовую защиту.

На фиг. 19.18 и 19.19 изображено два варианта продольной дифференциально-токовой защиты участка питательной сети переменного тока в однолинейном изображении.

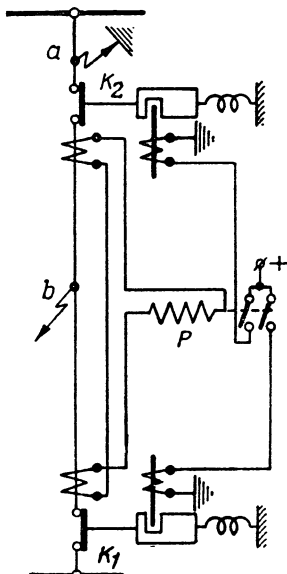
Схема на фиг. 19.18 называется схемой с циркулирующими токами, а схема на фиг. 19.19 — схемой с уравновешенными напряжениями. В этих схемах по обе стороны защищаемого участка сети включаются трансформаторы тока.

Вторичные обмотки трансформаторов тока в схеме с циркулирующими токами (фиг. 19.18) включены согласно, т. е. в нормальном режиме работы и при коротких замыканиях вне защищаемого участка (точка *a*) вторичные токи складываются. При этом ток в обмотке электромагнитного реле *P*, включенного параллельно вторичным обмоткам трансформаторов тока, близок к нулю (при одинаковых параметрах трансформаторов тока). При коротком замыкании в зоне, ограниченной трансформаторами тока (точка *b*), фаза тока в одном из трансформаторов тока меняется на 180° (при двухстороннем питании) или один из первичных токов становится равным нулю (при одностороннем питании). При этом в обмотке реле *P* появляется ток, реле срабатывает и, снимая контакторы *K*₁ и *K*₂ с защелок, отключает поврежденный участок сети.

В схеме с уравновешенными напряжениями (фиг. 19.19) вторичные обмотки трансформаторов тока включаются встречно и последовательно с обмоткой электромагнитного реле *P*. При нормальном режиме работы или при коротком замыкании вне зоны действия защиты (точка *a*) вторичные напряжения трансформаторов тока взаимно уравновешивают друг друга ($\dot{E}_1 = \dot{E}_2$), и ток в обмотке реле *P* близок к нулю. При коротком замыкании в зоне действия защиты (точка *b*) равновесие вторичных



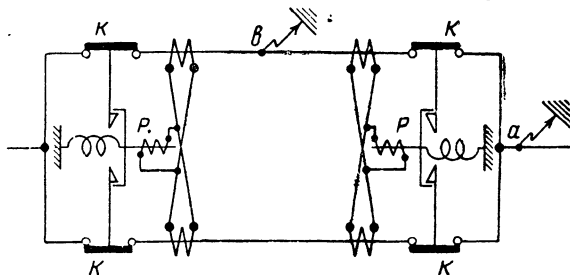
Фиг. 19.18. Принципиальная схема продольной дифференциальной защиты линии переменного тока с циркулирующими токами.



Фиг. 19.19. Принципиальная схема продольной дифференциальной защиты линии переменного тока с уравновешенными напряжениями.

напряжений нарушается ($\dot{E}_1 \neq \dot{E}_2$), и в обмотке реле появляется ток, заставляющий реле сработать и отключить защищаемый участок линии.

Таким образом, если в схеме с циркулирующими токами в нормальном режиме работы трансформаторы тока нагружены (по их обмоткам циркулирует номинальный ток), то в схеме с уравновешенными напряжениями при нормальном режиме работы трансформаторы тока работают в режиме холостого хода. Последнее приводит к перегреву стали магнитопроводов трансформаторов тока и к появлению во вторичных цепях напряжений, опасных для изоляции и обслуживающего персонала. Положительной стороной схемы с уравновешенными напряжениями является то, что обрыв вспомогательных проводов здесь не приводит к ложному срабатыванию защиты. Необходимость прокладки вспомогательных проводов защиты вдоль защищаемого участка линии ограничивает возможность использования продольной дифференциальной защиты для самолетной питательной сети, однако она может быть с успехом использована



Фиг. 19 20. Принципиальная схема поперечной дифференциальной защиты линии переменного тока.

для защиты отдельных объектов электрооборудования. Более перспективным для защиты самолетных питательных сетей переменного тока является использование поперечной дифференциальной защиты.

Принципиальная схема поперечной дифференциальной защиты участка самолетной питательной сети переменного тока с двухсторонним питанием изображена на фиг. 19. 20. На фиг. 19. 20 изображена защита лишь одной из трех фазовых линий, которая для возможности осуществления защиты расщеплена на два параллельных участка. С обоих концов защищаемой линии в каждый из участков включено по трансформатору тока. Поперечная дифференциальная защита, изображенная на фиг. 19. 20, выполнена по схеме с циркулирующими токами, когда при нормальном режиме работы вторичные токи трансформаторов тока складываются. При нормальном режиме работы и коротких замыканиях вне зоны действия защиты ток в обмотках реле P близок к нулю и защита не работает. При коротком замыкании в зоне действия защиты в обмотках реле P появляется ток, реле срабатывает и освобождает защелки, удерживающие контакты K в замкнутом состоянии. Специальные пружины, не показанные на фигуре, разорвут контакты K , и поврежденный участок линии будет отключен от сети.

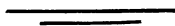
Поврежденный участок отключается с каждой стороны разрывом обеих расщепленных половин линии, благодаря чему, как указывалось выше, исключаются мертвые зоны защиты.

Следует отметить, что в самолетных питательных сетях переменного тока легче добиться равенства сопротивлений расщепленных участков защищаемой линии (которое требуется для правильной работы защиты), чем в самолетных сетях постоянного тока.

Объясняется это тем, что благодаря повышенному напряжению самолетных сетей переменного тока и значительному индуктивному со-

противлению линий (соизмеримому с активным сопротивлением) роль переходного сопротивления контактов в общем сопротивлении линии в сетях переменного тока несоизмеримо меньше, чем в сетях постоянного тока. Это облегчает настройку защиты и позволяет повысить ее чувствительность.

К недостаткам поперечной дифференциальной защиты питательных сетей переменного тока следует отнести ее некоторую громоздкость, так как для защиты одного участка линии (при двухстороннем питании) требуется шесть комплектов защиты. Однако этот недостаток можно устранить рациональным конструированием защиты, например, выполнив защиту всех трех фаз вместе в одном комплекте.



Глава XX

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ КОММУТАЦИИ САМОЛЕТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

§ 20.1. УСЛОВИЯ ВКЛЮЧЕНИЯ И ВЫКЛЮЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ И ПРОЦЕСС РАЗМЫКАНИЯ

Как указывалось выше, назначением коммутационной аппаратуры является включение, выключение и переключение электрических цепей. Функции защитной аппаратуры также тесно связаны с этими операциями. Процессы включения, выключения и переключения электрических цепей сопровождаются изменением запаса энергии в этих цепях. Последнее же, как правило, связано с выделением части этой энергии в виде тепла, света и работы ионизации в месте разрыва электрической цепи.

Процесс замыкания электрической цепи контактами того или иного коммутационного аппарата сопровождается кратковременным появлением искры. Исследования отечественных ученых В. В. Усова, Б. И. Лазаренко и др. показали, что в этом случае при сближении контактов напряженность поля между контактами растет и достигает при некотором очень небольшом расстоянии между контактами такой величины, при которой наступает пробой межконтактного промежутка в виде искры. Искра эта затем гасится замкнувшимися контактами. Если замыкание контактов происходит без их вибрации, то искра получается небольшой и в подавляющем большинстве случаев не влечет за собой сильного разрушения или ухудшения качества контактов (тем не менее иногда приходится все же прибегать и в этих случаях к искрогасительным средствам).

Несколько иная картина получается при размыкании контактов. Здесь следует различать несколько форм протекания процесса размыкания контактов.

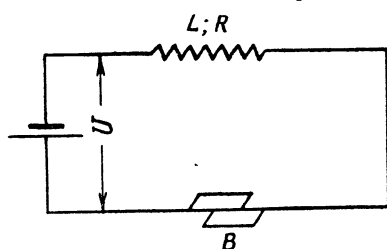
Если разрываемые токи и напряжения в цепи невелики, то процесс размыкания может быть безискровым. В этом случае при размыкании контактов место их соприкосновения вследствие нагрева прерывистым током плавится и образуется мостик из расплавленного материала контактов, который разрывается у контакта, соединенного с положительным полюсом источника тока, разрыв же цепи тока происходит без образования искры. Другой формой разрыва цепи тока контактами является разрыв, который сопровождается возникновением между контактами искры. Искра представляет собой по сути дела процесс пробоя межконтактного пространства и ионизации последнего.

После этого наступает быстрая деионизация межконтактного пространства, и цепь тока разрывается. Эта форма разрыва цепи возможна уже при больших значениях разрываемого тока и напряжения, чем предыдущая, безискровая форма разрыва цепи. Наконец, третья форма

разрыва цепи, наступающая при еще больших значениях разрываемого тока, чем предыдущая, сопровождается интенсивной ионизацией межконтактного пространства и появлением между контактами устойчивой дуги. Для гашения этой дуги необходимо прибегать к специальным мероприятиям, основные из которых описаны ниже.

В качестве обоснования приведенного выше разграничения форм разрыва электрической цепи, основанного на опытных данных, ниже приводится аналитическое рассмотрение процесса разрыва тока в цепи, изображенной на фиг. 20. 1.

Выключатель B разрывает цепь тока посредством постепенного изменения величины поверхности соприкосновения контактов, благодаря чему в месте разрыва цепи возникает некоторое сопротивление, плавно меняющееся от некоторого конечного значения в момент начала процесса



Фиг. 20. 1. Разрыв тока в цепи, содержащей индуктивность.

размыкания до бесконечно большой величины в конце процесса. Замену внезапного разрыва тока в этой цепи постепенным можно сделать на основании того, что в действительности на практике мгновенно цепь тока никогда не разрывается. Если бы разрыв цепи тока происходил мгновенно, то на контактах образовалось бы бесконечно большое напряжение, чего никогда не бывает в действительности.

Процесс разрыва тока происходит так, что его можно уподобить выключению, осуществляемому скользящими контактами, плавно увеличивающими сопротивление цепи в месте разрыва. В первом приближении можно считать, что сопротивление цепи в месте разрыва растет по следующему закону:

$$r = \frac{R_0 T}{T - t}, \quad (20. 1)$$

где T — полное время размыкания контактов;

R_0 — величина сопротивления в начале процесса размыкания.

Подобный характер изменения сопротивления в месте разрыва соответствует линейному (во времени) уменьшению проводимости контактов в процессе размыкания.

Для цепи, изображенной на фиг. 20. 1, можно написать

$$U = L \frac{di}{dt} + \frac{R_0 T}{T - t} i + Ri, \quad (20. 2)$$

где R — омическое сопротивление, а L — индуктивность катушки.

Последний член в правой части уравнения (20. 2) оказывает малое влияние на процесс в конце размыкания контактов, и, пренебрегая им, получают

$$\frac{di}{dt} + \frac{R_0 T}{L(T - t)} i = \frac{U}{L}. \quad (20. 4)$$

Последнее уравнение является обыкновенным неоднородным дифференциальным уравнением и интегрируется в квадратурах.

Интеграл этого уравнения равен

$$i = e^{-\int \frac{R_0}{L} \frac{T}{T-t} dt} \left[C_1 + \int \frac{U}{L} e^{\int \frac{R_0}{L} \frac{T}{T-t} dt} dt \right], \quad (20. 5)$$

где C_1 — произвольная постоянная, определяемая из начальных условий.

Интегрирование уравнения (20.5) при начальных условиях $t=0$; $i_0 \approx \frac{U}{R_0}$ дает

$$i = \frac{U}{\left(\frac{R_0 T}{L} - 1\right) L} \left[(T-t) - \frac{(T-t)^{\frac{R_0 T}{L}}}{\frac{R_0 T}{L} T^{\frac{R_0 T}{L}-1}} \right]. \quad (20.6)$$

Напряжение между контактами в процессе размыкания равно

$$u_k = ir = \frac{R_0 T}{T-t} i = \frac{U}{\left(\frac{R_0 T}{L} - 1\right)} \left[\frac{R_0 T}{L} - \left(\frac{T-t}{T}\right)^{\frac{R_0 T}{L}-1} \right]. \quad (20.7)$$

На фиг. 20.2 изображены зависимости тока и напряжения между контактами от времени t , построенные на основании уравнений (20.6) и (20.7).

Кривая 1 изображает закон изменения тока при $L=0$, кривая 2 — при $L=L_1$ и кривая 3 — при $L=L_2 > L_1$. Кривая 4 изображает зависимость напряжения между контактами от времени в процессе размыкания контактов.

Как видно из фиг. 20.2, напряжение между контактами при размыкании растет по гиперболическому закону. В конце процесса размыкания при $t=T$ напряжение составляет

$$u_{k \max} = (u_k)_{t=T} = \frac{U}{1 - \frac{L}{R_0 T}} \quad \text{при} \quad \frac{L}{R_0 T} < 1,$$

и теоретически это напряжение стремится к бесконечности:

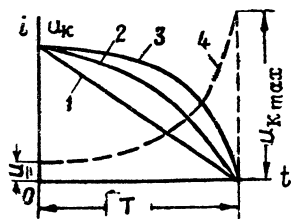
$$U_{k \max} \rightarrow \infty \quad \text{при} \quad \frac{L}{R_0 T} \rightarrow 1.$$

Отрицательные значения для u_k при $\frac{L}{R_0 T} > 1$ не имеют физического смысла, и поэтому этот случай отбрасывается. Из последних соотношений можно сделать вывод, что напряжение в конце разрыва цепи имеет конечное значение лишь при $\frac{L}{R_0 T} < 1$. Очевидно, лишь в этом случае возможен разрыв электрической цепи, изображенной на фиг. 20.1, без искро- и дугообразования. В случае если $\frac{L}{R_0 T} \geq 1$, разрыв цепи тока сопровождается искрой или дугой.

Следует отметить, что в реальных электрических цепях условие $\frac{L}{R_0 T} < 1$ соблюдается очень редко, поэтому разрыв цепи электрического тока сопровождается обычно искрой или дугой.

§ 20.2. ВОЛЬТАМПЕРНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДУГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

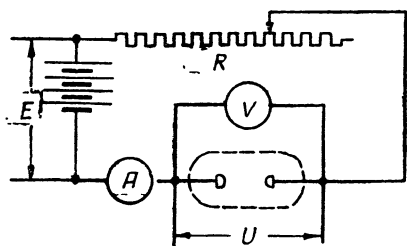
На фиг. 20.3 изображена цепь, состоящая из межконтактного пространства и большого сопротивления. Если в такой цепи в межконтактном пространстве появится ток дугового разряда, то вольтамперную харак-



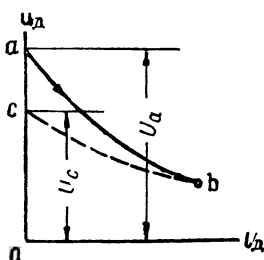
Фиг. 20.2. Зависимость от времени тока и напряжения между контактами при разрыве цепи, изображенной на фиг. 20.1.

теристику разряда для больших токов (от десятых долей ампер и выше) можно представить в грубом приближении кривой, изображенной на фиг. 20. 4.

Здесь точка *a* соответствует моменту возникновения дуги между контактами. Напряжение U_a , соответствующее моменту возникновения дуги, называется напряжением зажигания дуги.



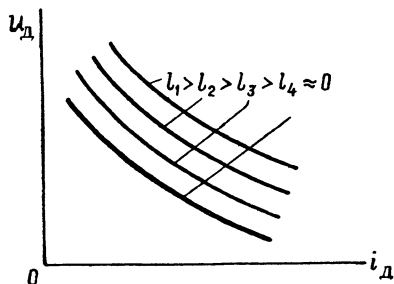
Фиг. 20. 3. Схема для получения вольтамперной характеристики электрического разряда.



Фиг. 20. 4. Вольтамперная характеристика дуги постоянного тока.

Характеристика, изображенная на фиг. 20. 4, соответствует вольтамперной характеристике дуги установившегося постоянного тока. Такая характеристика носит название статической характеристики дуги.

Очевидно, что статическая характеристика дуги должна сниматься для таких ее состояний, при которых количество вновь ионизированных частиц в единицу времени в дуговом промежутке равно количеству рекомбинируемых, т. е. для установившихся состояний в дуге.



Фиг. 20. 5. Статические характеристики дуги постоянного тока при различных расстояниях между электродами.

Если после медленного увеличения тока в дуге по статической характеристике до точки *b* затем быстро уменьшать его до нуля, то характеристика дуги для процесса уменьшения тока получается иной. Она проходит ниже статической характеристики дуги, причем тем ниже, чем быстрее уменьшается ток в дуге (см. пунктирную кривую на фиг. 20. 4). Вольтамперная характеристика дуги, полученная при быстром уменьшении тока в дуге, носит название динамической характеристики дуги, а напряжение дуги U_c (точка *c*), соответствующее току, равному нулю, называется напряжением гашения дуги.

В дальнейшем для простоты процессы в дуге рассматриваются по статической характеристике дуги.

С уменьшением давления газа между электродами статическая характеристика дуги опускается, так как процесс ударной ионизации начинается в этом случае при меньшей величине напряжения.

При данной конструкции электродов и постоянном давлении газа между электродами характер статической характеристики дуги зависит от расстояния между электродами. Чем больше расстояние *l* между электродами, тем выше располагается статическая характеристика дуги (фиг. 20. 5).

Для данных конструкций электродов и давления газа существует некоторое минимальное расстояние между электродами, при котором возможно существование устойчивой дуги. Характеристика этой дуги

минимальной длины (практически длина такой дуги близка к нулю) располагается ниже всех других характеристик и изображена на фиг. 20.5 жирной линией.

Имеется ряд эмпирических формул для аналитического выражения вольтамперной характеристики дуги при нормальных атмосферных условиях. Ниже приводятся некоторые из них:

$$u_d = a + bl + \frac{c + dl}{i_d^n}, \quad (20.8)$$

где a , b , c и d — постоянные, зависящие от материала контактов. Например, для медных контактов $a=30$; $b=17$; $c=41$; $d=3,3$;

l — длина дуги;

n — показатель степени, зависящий от температуры материала анода $n=2,62 \cdot T \cdot 10^{-4}$;

T — температура материала анода в $^{\circ}\text{K}$.

Для дуг длиной больше 2,5 мм и токов порядка нескольких ампер можно принять

$$u_d = A + \frac{B}{i_d}, \quad (20.9)$$

где A и B — линейные функции от расстояния между электродами l :

$$A = \alpha + \beta l;$$

$$B = \gamma + \delta l,$$

где l выражено в см.

Для дуги между угольными электродами, имеющей в воздухе диаметр около 1 см,

$$\alpha = 39; \quad \gamma = 11,7;$$

$$\beta = 0,21; \quad \delta = 1,05.$$

§ 20.3. УСЛОВИЯ УСТОЙЧИВОГО ГОРЕНИЯ ДУГИ. УСЛОВИЯ ГАШЕНИЯ ДУГИ

Для электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных с дуговым промежутком сопротивления R и индуктивности L , можно написать следующие уравнения, характеризующие состояние равновесия и переходный режим:

$$U = L \frac{di}{dt} + iR + u_d,$$

где U — приложенное к цепи напряжение;

u_d — напряжение на дуге.

Последнее уравнение можно переписать в следующем виде:

$$L \frac{di}{dt} = U - iR - u_d. \quad (20.10)$$

На фиг. 20.6 изображена зависимость напряжения дуги u_d и разности $(U - iR)$ от тока дуги.

При установившемся состоянии, когда $\frac{di}{dt} = 0$, и в случае наступления равновесия

$$\Delta u = (U - iR) - u_d = 0. \quad (20.11)$$

Исследования показывают, что состояние равновесия получается устойчивым тогда, когда

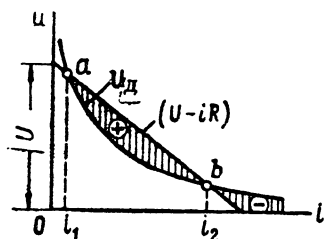
$$\frac{d(U - iR)}{di} < \frac{du_d}{di}$$

или

$$R > -\frac{du_d}{di}. \quad (20.12)$$

Если же $R < -\frac{du_d}{di}$, то горение дуги неустойчиво, в этом случае дуга или переходит в другой режим или гаснет.

На основании этих рассуждений можно сделать вывод о том, что точка a на фиг. 20.6 характеризует неустойчивое состояние равновесия дуги, а точка b — устойчивое состояние, т. е. устойчивое горение дуги.



Фиг. 20.6. Зависимость напряжения дуги u_d и $(U - iR)$ от тока дуги.

Какие же условия нужно выполнить для того, чтобы между контактами не могла возникнуть устойчивая дуга? Из фиг. 20.6 следует, что дуга не возникнет в том случае, если прямая $(U - iR)$ нигде не пересекается с вольтамперной характеристикой дуги. Последнее возможно лишь в том случае, если вольтамперная характеристика дуги проходит выше прямой $(U - iR)$, нигде не касаясь ее. Чтобы поднять вольтамперную характеристику дуги, можно увеличить давление газа или увеличить расстояние между электродами. Для увеличения давления газа между

электродами (например, при больших высотах полета) необходимо герметизировать контактное устройство и иметь специальное оборудование для наддува воздуха в межконтактное пространство. Ввиду сложности конструкции контактных устройств, которые получаются в этом случае, этот способ борьбы с устойчивой дугой между контактами в самолетной коммутационной аппаратуре распространения не получил.

Вольтамперную характеристику дуги можно поднять, как это видно из фиг. 20.5, увеличивая расстояния между контактами дуги.

Последнее мероприятие является наиболее эффективным средством борьбы с устойчивой дугой между контактами, и к нему часто прибегают при конструировании многих типов самолетной коммутационной аппаратуры. Однако в ряде случаев ставится условие отсутствия устойчивой дуги даже при самых малых расстояниях между контактами.

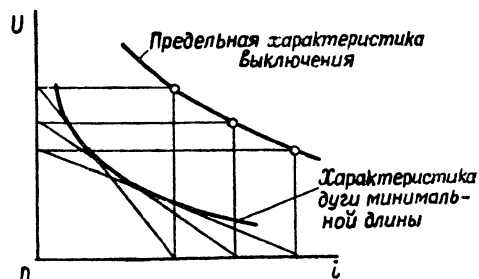
Обеспечить это требование можно лишь снижая величины разрываемых токов и напряжений так, чтобы прямая $(U - iR)$ лежала ниже характеристики дуги минимальной длины, изображенной на фиг. 20.5 жирной линией. Предельный, или критический, случай устойчивой дуги соответствует касанию прямой $(U - iR)$ с характеристикой дуги минимальной длины. Принимая во внимание, что точка пересечения прямой $(U - iR)$ с осью ординат определяется напряжением сети, а с осью абсцисс — током в цепи при замкнутых контактах, можно построить зависимость допустимого напряжения сети от величины тока, разрываемого контактами, для предельного случая отсутствия устойчивой дуги.

Для этого достаточно провести серию касательных к характеристике дуги минимальной длины, как это изображено на фиг. 20.7, и для каждой из таких касательных определить соответствующие значения U и I . Зависимость напряжения сети (или напряжения между контактами при их разомкнутом состоянии) от тока в цепи при замкнутых контактах для

предельного случая возникновения устойчивой дуги построена на той же фиг. 20.7 и носит название предельной характеристики выключения.

Однако если выбрать параметры выключаемой цепи согласно предельной характеристике выключения, то это не значит, что возможность появления дуги будет полностью исключена. Остается не исключенной возможность кратковременного появления неустойчивого разряда в виде искры за счет возникновения дополнительного напряжения на индуктивности, тем большего, чем быстрее проходит процесс выключения.

В практических цепях всегда имеется индуктивность, поэтому если пользоваться предельной характеристикой выключения, то при выключении будет всегда появляться кратковременная дуга или искра. Отсутствие ее возможно лишь в том случае, если прямая $(U - iR)$ идет несколько ниже характеристики дуги минимальной длины.



Фиг. 20.7. Построение предельной характеристики выключения.

§ 20.4. ОСОБЕННОСТИ ГОРЕНИЯ И ГАШЕНИЯ ДУГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Основными уравнениями, характеризующими процессы в цепях переменного тока при наличии электродов, между которыми может образоваться дуговой разряд, являются:

для цепей без индуктивности

$$U_{\max} \sin \omega t = Ri + u_d; \quad (20.13)$$

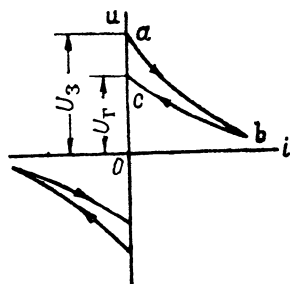
для цепей с индуктивностью

$$U_{\max} \sin \omega t = L \frac{di}{dt} + Ri + u_d, \quad (20.14)$$

где u_d — напряжение дуги, равное при $n \approx 1$ [формула (20.8)]

$$u_d = a + bl + \frac{c + dl}{i};$$

Фиг. 20.8. Вольтамперные характеристики дуги переменного тока.



$U_{\max}$ — амплитудное значение приложенного напряжения.

Так как напряжение и ток в цепи переменного тока периодически проходят через нулевое значение, то и дуга переменного тока периодически гаснет в моменты прохождения тока в цепи дуги через нулевое значение. Напряжение на дуге также меняет свой знак.

Вольтамперная характеристика дуги переменного тока за время одного периода имеет вид, представленный на фиг. 20.8. Здесь стрелками указано направление изменения тока, при котором снят тот или иной участок характеристики дуги.

Напряжение зажигания дуги обозначено U_3 , а напряжение гашения — U_r .

Если предположить, что длина дуги l остается все время постоянной, то процесс в электрической цепи, содержащей лишь активное сопротивление R , протекает так, как это изображено на фиг. 20.9,а. Когда напряжение достигает значения U_a , образуется дуга, напряжение между кон-

тактами u_d резко падает до значения U_b . Дуга гаснет, когда напряжение u_d и ток i_d достигают некоторого определенного значения. В случае изменения l со временем ток $i_{d \max}$ уменьшается, а напряжение u_d возрастает с каждым полупериодом (см. фиг. 20.9,б).

Решая уравнения (20.13) относительно i , находят

$$i = \frac{U_{\max} \sin \omega t - (a + bl)}{2R} \pm \sqrt{\frac{[U_{\max} \sin \omega t - (a + bl)]^2 - 4R(c + dl)}{4R^2}}. \quad (20.15)$$

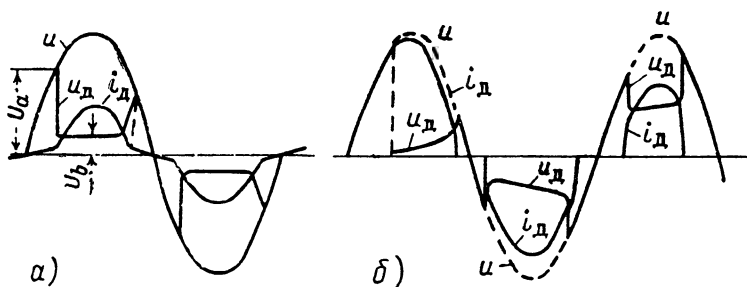
Исследование этого уравнения показывает, что максимальная длина дуги, при которой возможно горение, может быть легко найдена из равенства

$$[U_{\max} - (a + bl)]^2 = 4R(c + dl),$$

при условии что

$$U_{\max} > a + bl.$$

Гашение дуги переменного тока облегчается тем, что через каждый полупериод дуга гаснет вследствие прохождения тока через нулевое зна-



Фиг. 20.9. Процессы в электрической дуге при наличии в цепи лишь активного сопротивления.

чение. За небольшое время потухания дуги энергия к дуге не подводится и происходит интенсивная деионизация дугового промежутка и быстрое увеличение его диэлектрической прочности.

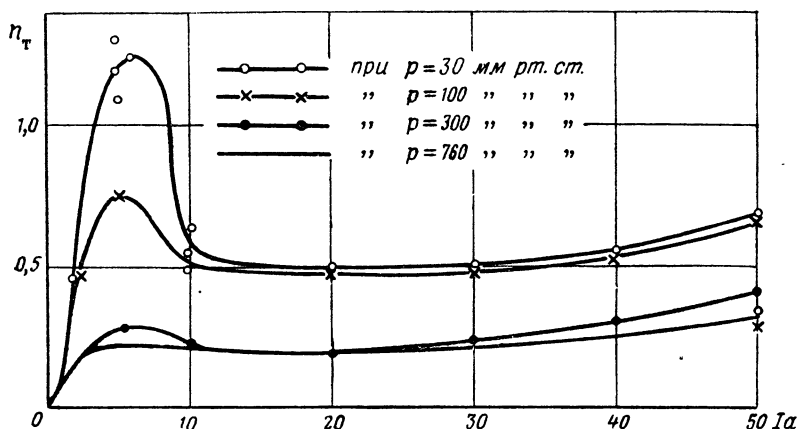
Вновь загореться электрическая дуга сможет только в том случае, если напряжение между контактами в последующем окажется больше возрастающей диэлектрической прочности дугового промежутка. Другими словами, условия гашения дуги переменного тока можно сформулировать так. Если после того, как дуга погасла при прохождении тока через нуль, диэлектрическая прочность дугового промежутка остается все время больше напряжения, приложенного к дуговому промежутку, то дуга больше не возобновится. Если в какой-либо момент времени напряжение, приложенное к дуговому промежутку, окажется больше диэлектрической прочности дугового промежутка, то дуга загорится вновь и будет гореть до следующего перехода тока через нуль.

Исследования показывают, что в первый момент после прохождения тока через нуль происходит энергичная деионизация околокатодного пространства, вследствие чего практически мгновенно восстанавливается диэлектрическая прочность дугового промежутка до величины, равной приблизительно 150—250 в. Этим практически мгновенным восстановлением диэлектрической прочности околокатодного пространства объясняется простота гашения дуг переменного тока в сетях переменного тока напряжением 220 в и ниже.

Помимо напряжения, основными факторами, влияющими на время горения дуги между контактами коммутационной аппаратуры, являются величина разрываемого тока, давление атмосферного воздуха, частота тока и скорость размыкания контактов.

На фиг. 20.10 изображена зависимость времени горения дуги от величины разрывающего тока для различных величин давления окружающего воздуха.

Время горения дуги измерялось числом периодов горения дуги при частоте тока 400 гц. Как видно, эти кривые имеют ясно выраженный максимум.



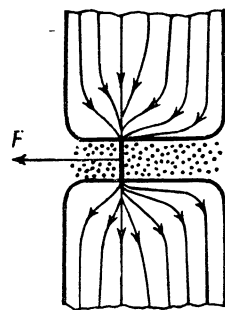
Фиг. 20.10. Зависимость длительности горения дуги в периодах отключаемого тока n_T от величины тока при различных давлениях окружающего воздуха.

Такой характер зависимости времени горения дуги от тока согласно исследованиям В. В. Телешева объясняется эффектом гашения дуги, вызванным собственным магнитным полем тока дуги. Ток к стволу дуги всегда подходит не равномерно со всех сторон, а имеется некоторая асимметрия в линиях подходящего тока (фиг. 20.11).

Вследствие этой асимметрии в межконтактном пространстве имеется некоторое результирующее магнитное поле, для случая, изображенного на фиг. 20.11, направленное из-за плоскости чертежа.

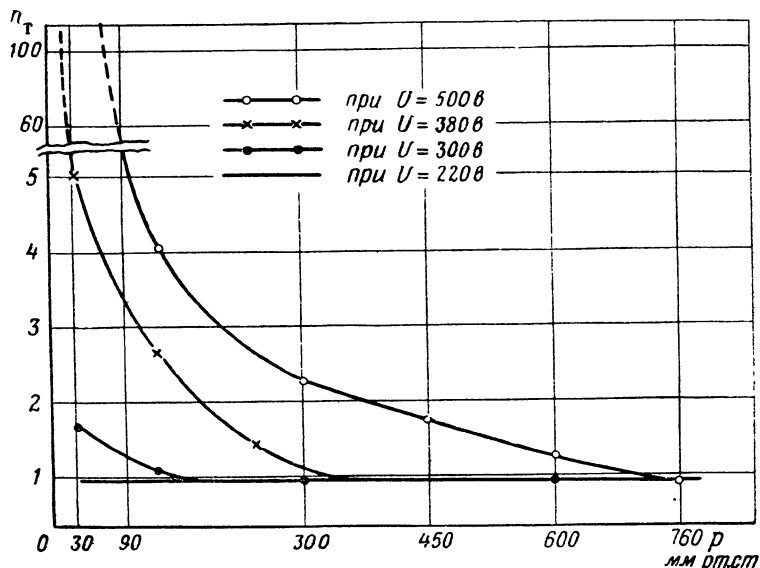
Ствол дуги представляет собой по существу легкоподвижный проводник с током. Вследствие взаимодействия магнитного поля разрывающего тока с током в стволе дуги возникает сила, стремящаяся переместить ствол дуги (для случая, изображенного на фиг. 20.11, эта сила будет действовать влево).

Очевидно, что чем больше разрываемый ток, тем интенсивнее происходит выдувание дуги и уменьшается время ее горения. При малых токах, когда эффект гашения дуги за счет собственного магнитного поля невелик, время горения дуги растет с ростом тока, так как с ростом тока увеличивается энергия, выделяемая в дуге (начальный участок кривых на фиг. 20.10). В дальнейшем все сильнее начинает сказываться эффект самогашения дуги, поэтому время горения дуги, достигнув максимального значения, при дальнейшем увеличении тока начинает уменьшаться. Последующее увеличение времени горения дуги (правый участок кривых на фиг. 20.10) объясняется сильным нагревом контактов при больших токах в дуге. Следует отметить, что как величина максимума времени горения дуги, так и значение тока, при котором он наступает, сильно зависят от формы и конструкции контактов.



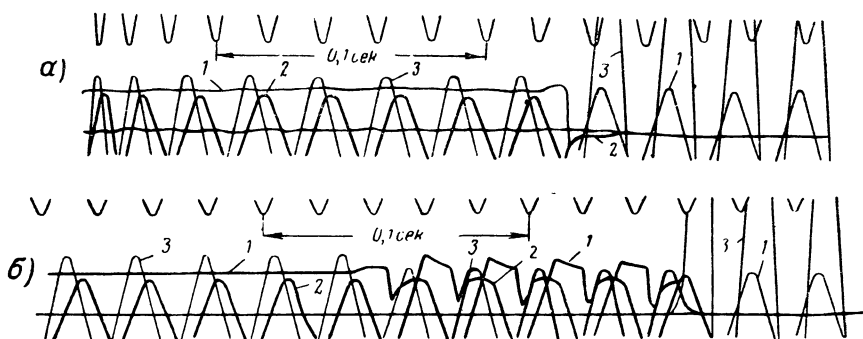
Фиг. 20.11. Линии тока, подходящего к стволу дуги.

На фиг. 20.12 изображена зависимость времени горения дуги (в периодах переменного тока частотой 400 гц) от давления атмосферного воздуха при различных величинах напряжения. Как видно, с уменьшением давления атмосферного воздуха (с увеличением высоты полета)



Фиг. 20.12. Зависимость длительности горения дуги в периодах отключаемого тока n_T от давления воздуха при различных напряжениях источника.

время горения дуги возрастает, т. е. условия ее гашения ухудшаются. Это объясняется уменьшением диэлектрической прочности воздуха с уменьшением его давления.



Фиг. 20.13. Осциллограммы гашения дуги в наземных (а) и высотных (б) условиях.

На фиг. 20.13 изображены сравнительные осциллограммы горения электрической дуги переменного тока между контактами при различных давлениях атмосферного воздуха. На фиг. 20.13,а изображена осциллограмма горения дуги при нормальном атмосферном давлении окружающего воздуха, а на фиг. 20.13,б — при давлении окружающего воздуха, равном 30 мм рт. ст., что соответствует высоте полета $h=22$ км.

На фиг. 20.13 кривая 1 представляет собой напряжение на контактах, кривая 2 — ток, протекающий через контакты (ток дуги), кривая 3 — напряжение источника питания. Из осциллограмм видно, что при нормальном атмосферном давлении время горения дуги меньше одного полупериода, в то время как при прочих равных условиях и давлении окружающего воздуха, равном 30 мм рт. ст., время горения составляет уже шесть полупериодов переменного тока.

На фиг. 20.14 приведена зависимость времени горения дуги от частоты тока для различных напряжений и для чисто активной цепи. Как видно, эта зависимость имеет явно выраженный минимум в диапазоне частот 300–400 гц. Такой характер зависимости времени горения дуги от частоты тока имеет следующее объяснение:

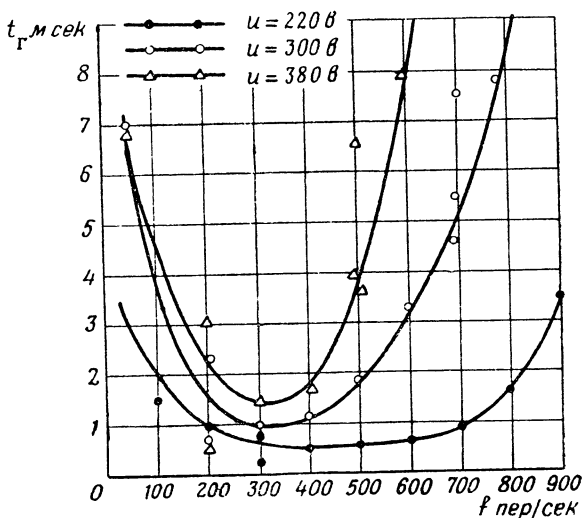
При небольших частотах тока с увеличением частоты уменьшается время горения дуги в пределах одного периода. Следовательно, уменьшается и количество энергии, выделяемое в дуге за один полупериод, чем и объясняется уменьшение времени горения дуги с увеличением частоты в начале кривых на фиг. 20.14.

При дальнейшем увеличении частоты наряду с уменьшением количества энергии, выделяемого в дуге за один полупериод, существенное значение начинает приобретать увеличение скорости нарастания напряжения и уменьшение времени, приходящегося на деионизацию межконтактного пространства. Как уже указывалось, для гашения дуги скорость восстановления диэлектрической прочности межконтактного пространства должна быть больше скорости нарастания напряжения на контактах. Скорость восстановления диэлектрической прочности межконтактного пространства мало зависит от частоты тока, в то время как скорость нарастания напряжения на контактах в прямом отношении связана с частотой тока. Этим и объясняется увеличение времени горения дуги при увеличении частоты более 300–400 гц.

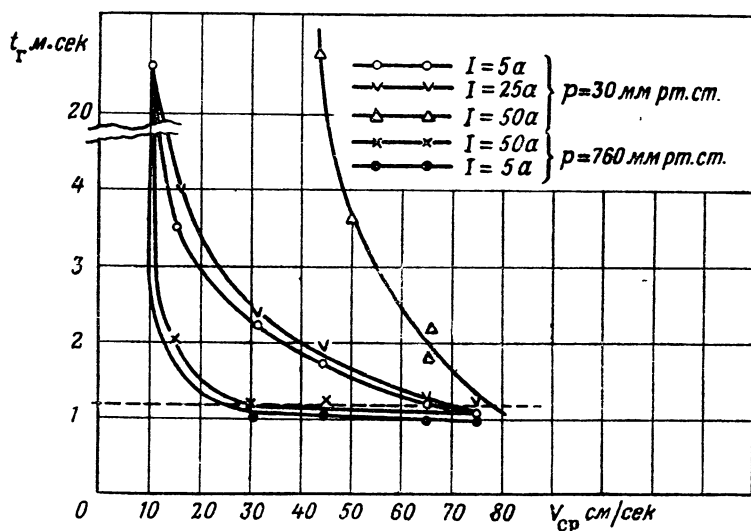
Следует отметить, что при индуктивном характере цепи такой зависимости времени горения дуги от частоты не наблюдается. Объясняется это тем, что в этом случае скорость нарастания напряжения после прохождения тока через нуль определяется не частотой тока, а параметрами цепи.

Наконец, на фиг. 20.15 изображена зависимость времени горения дуги от скорости размыкания контактов для двух значений давления атмосферного воздуха (30 и 760 мм рт. ст.).

С увеличением скорости размыкания контактов время горения дуги уменьшается вследствие того, что в этом случае (при прочих равных условиях) длина дуги в отдельные моменты периода размыкания получается большей.



Фиг. 20.14. Зависимость длительности горения дуги от частоты при различных напряжениях и давлении воздуха $p = 41$ мм рт. ст.



Фиг. 20.15. Зависимость времени горения дуги от скорости размыкания контактов при различных разрываемых токах.

§ 20.5. СПОСОБЫ ГАШЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

Основными способами гашения дуги являются дробление дуги на ряд последовательных дуг, условия гашения которых значительно проще, и увеличение длины дуги с помощью естественного или искусственного дутья. Простейший способ дробления дуги на две последовательные дуги заключается в применении контактов с двойным разрывом (фиг. 20.16).

Дробление дуги на большее число последовательных дуг осуществляется посредством применения деионных камер. Изобретателем деионных камер и устройства для дробления дуги является М. О. Доливо-Добровольский. Деионная камера, в которой происходит разрыв контактов, представляет собой решетку, выполненную из цемент-асбеста. В этой камере помещен ряд омедненных железных пластин, изолированных друг от друга. Дуга, возникающая при разрыве контактов в такой камере, приходит в соприкосновение с омедненными железными пластинами, благодаря чему разбивается на ряд последовательно соединенных дуг и быстро гаснет.

Помимо действия магнитного поля, выдуванию дуги вверх способствуют также и потоки воздуха, нагреваемого дугой.

В некоторых случаях для увеличения магнитного поля дуги применяют дополнительные обмотки, обтекаемые разрываемым током, или постоянные магниты.

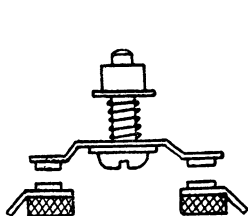
Помимо этого способа гашения дуги, широкое распространение нашел также способ гашения дуги посредством искусственного увеличения ее длины посредством применения специальных рогов, использования тепловых потоков воздуха и применения магнитного дутья.

Удлинение дуги с помощью специальных рогов и использования тепловых потоков воздуха иллюстрируется фиг. 20.17.

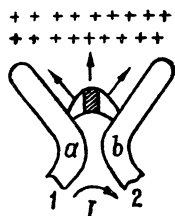
Дуга, возникшая в первый момент разрыва контактов в узкой их части $a-b$, вследствие электродинамического эффекта и частично благодаря тепловым потокам воздуха, нагретого дугой, перемещается по роговидным контактам вверх. Вследствие этого увеличивается ее длина и, следовательно, облегчаются условия ее гашения. С целью интенсификации

выдувания дуги ее помещают иногда в магнитное поле, создаваемое током в цепи дуги или специальными постоянными магнитами. Если магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости чертежа (крестики « $\times$ » на фиг. 20.17), то нетрудно убедиться (по правилу левой руки), что сила, действующая на дугу, будет направлена вверх, т. е. стремится растянуть дугу на роговидных контактах.

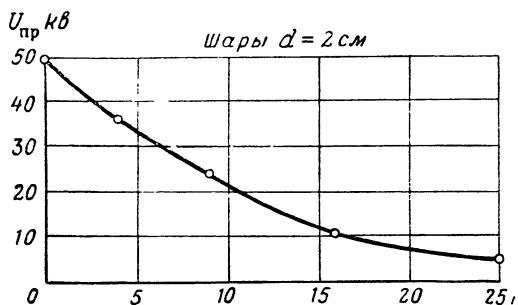
Следует отметить, что, помимо удлинения и дробления дуги, используемых в приведенных выше методах, существенное значение для ее гашения имеет также охлаждающее действие потоков воздуха и стенок камер, которые способствуют деионизации дугового промежутка. Во время высотных полетов, при пониженном давлении атмосферного воздуха и повышенной интенсивности действия космических лучей, создаются условия, благоприятствующие существованию устойчивой электрической дуги. Известно, что пробивное напряжение воздуха уменьшается с увеличением высоты полета. На фиг. 20.18 приведена зависимость пробивного напряжения (максимальной величины) воздуха от высоты полета по данным Н. Ф. Волощенко. Пониженное пробивное напряжение воздуха на больших высотах полета приводит к затягиванию процесса гашения электрической дуги.



Фиг. 20.16. Контакты с двойным разрывом.



Фиг. 20.17. Удлинение дуги с помощью рогов.



Фиг. 20.18. Зависимость пробивного напряжения воздуха от высоты полета.

При полетах на больших высотах ряд указанных выше способов гашения электрической дуги недостаточно эффективен. Опыты показывают, что ликвидация возникшей электрической дуги при пониженном атмосферном давлении значительно сложнее, чем при нормальном атмосферном давлении.

Наиболее эффективными средствами гашения дуги в высотных условиях является увеличение расстояния между контактами и применение искусственного наддува для повышения давления воздуха, окружающего контакты.

Глава XXI

ЭКСПЛУАТАЦИЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА САМОЛЕТАХ

§ 21.1. ТРЕБОВАНИЯ К ИЗОЛЯЦИИ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА САМОЛЕТАХ

На самолетах, имеющих двухпроводную систему передачи электрической энергии, все токоведущие детали и провода электрически изолируются друг от друга и от корпуса самолета. На самолетах, имеющих однопроводную систему передачи электрической энергии, все провода и детали, находящиеся в плюсовой (а частично и в минусовой) цепи, изолируются друг от друга и от корпуса самолета. Что же касается главного минусового провода, в качестве которого используется металлический корпус самолета, то отдельные части его должны иметь надежное электрическое соединение между собою и со всеми остальными металлическими частями самолета.

Надежная изоляция системы передачи и распределения электрической энергии на самолетах предотвращает возможность возникновения искровых разрядов между проводами и частями разной полярности, замыкания проводов на корпус самолета и друг с другом и поражения обслуживающего персонала током при случайных прикосновениях к токоведущим частям.

О качестве изоляции системы передачи и распределения электрической энергии на самолете можно судить прежде всего по тому сопротивлению, которое оказывает изоляция прохождению через нее токов утечки. Кроме того, качество изоляции характеризуется напряжением, необходимым для ее пробоя.

Поэтому о качестве изоляции системы передачи и распределения электрической энергии на самолете судят по омическому сопротивлению применяемых в ней изоляционных материалов и их способности выдерживать определенное напряжение на пробой. Особенно большое значение имеет качество изоляции проводов электрической сети, так как изоляционные качества оболочек, покрывающих токоведущие жилы, значительно ниже изоляционных качеств других изолирующих деталей (прокладок, втулок, панелей, щитков и т. д.).

На состояние изоляции проводов сети влияют главным образом влажность и температура окружающей среды, механические и химические воздействия и срок службы.

Опыты показывают, что сопротивление изоляции проводов очень сильно зависит от влажности окружающего воздуха. При большой влажности окружающего воздуха сопротивление изоляции может уменьшаться в сотни и даже тысячи раз против нормального ее значения. Объясняется это тем, что влага окружающей среды конденсируется в порах

изолирующих материалов и растворяет мельчайшие частицы солей на изоляции. Кроме того, влага впитывает в себя углекислоту из воздуха. Все это приводит к тому, что влага в порах изоляционных материалов приобретает свойства электролита, который является, как известно, хорошим проводником тока.

Поэтому при неблагоприятных условиях с точки зрения влажности окружающего воздуха сопротивление изоляции может оказаться значительно меньше нормы даже в том случае, если монтаж системы передачи и распределения электрической энергии соответствует всем техническим требованиям.

Однако процесс такого резкого ухудшения изоляции проводов сети вследствие повышенной влажности окружающего воздуха является обратимым. Достаточно поместить систему передачи и распределения электрической энергии самолета в условия нормальной влажности окружающего воздуха, для того чтобы сопротивление изоляции проводов быстро восстановилось до нормы.

Колебания температуры окружающей среды ухудшают изоляционные свойства проводов. При резких колебаниях температуры в самолетных условиях (от -50 до $+100^{\circ}\text{C}$) изоляция проводов со временем выкрашивается, резиновый слой раскисает, что приводит к ухудшению изоляционных качеств слоя изоляции.

Механические повреждения изоляции проводов, вероятность которых велика в боевых условиях (разрушение оболочки проводов при простреле и повреждении осколками), приводят к оголению токоведущих частей и последующему замыканию их друг с другом и с корпусом самолета. Это в свою очередь может привести, как указывалось выше, к пожару, взрыву или аварии.

Очень вредное химическое действие на качество изоляции проводов оказывают пары бензина, керосина, масла. Разрушение и ухудшение изоляции, которые имеют место в этом случае, являются необратимыми и могут быстро привести к резкому увеличению токов утечки и к последующим замыканиям.

Опыт показывает, что качество изоляции проводов сильно зависит от срока службы. Со временем изоляционный материал высыхает, делается ломким, хрупким и теряет свои изоляционные качества.

Недостаточно высокое качество изоляции системы передачи и распределения электрической энергии приводит к появлению больших токов утечки, что отрицательно сказывается на работе ряда потребителей электрической энергии. Например, появление в цепи датчиков многих измерительных приборов мостикового типа небольшой утечки, шунтирующей чувствительный элемент, вызывает ошибочные показания этих приборов. Появление значительных токов утечки приводит к прогрессивному ухудшению изоляции, которое может окончиться коротким замыканием или пожаром. Уменьшение сопротивления изоляции может привести к поражению током обслуживающего персонала.

Поэтому к сопротивлению изоляции системы передачи и распределения электрической энергии самолета предъявляют жесткие требования.

Согласно указаниям и инструкциям нормальной величиной сопротивления изоляции системы передачи и распределения электрической энергии самолетов (при влажности окружающего воздуха не выше 70 %) является 100 000 ом и больше для самолетов, оборудованных двухпроводной системой передачи электрической энергии, и 300 000 ом и больше для самолетов, оборудованных однопроводной системой передачи электрической энергии. Сопротивление утечки одного фидера независимо от системы передачи должно быть не менее 10 мгом .

Следует подчеркнуть, что сопротивление утечки зависит от степени разветвленности электрической сети самолета и общей протяженности ее проводов. Чем более разветвлена самолетная электрическая сеть (самолеты, сильно насыщенные электрооборудованием) и чем больше протяженность ее проводов, тем из большего числа параллельно включенных сопротивлений образуется общее сопротивление утечки и тем, следовательно, оно меньше.

§ 21.2. КОНТРОЛЬ ЗА СОСТОЯНИЕМ ИЗОЛЯЦИИ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В предыдущем параграфе указывалось, что величина сопротивления изоляции системы передачи и распределения электрической энергии на самолете имеет очень большое значение. Поэтому в условиях эксплуатации необходим систематический контроль за величиной этого сопротивления изоляции.

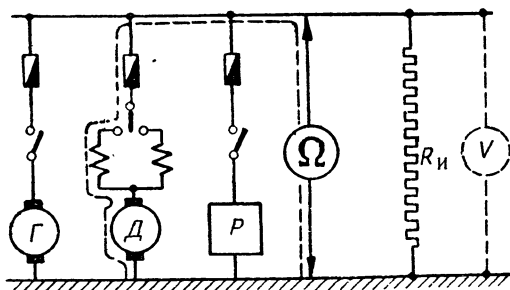
Измерение сопротивления изоляции системы передачи и распределения электрической энергии на самолете может производиться как омметрами магнитоэлектрического типа с источником тока низкого напряжения, так и мегомметрами (мегаггерами) постоянного и переменного тока с напряжением 250—500 в.

Кроме того, измерение сопротивления изоляции можно

производить с помощью обыкновенных магнитоэлектрических вольтметров со шкалой на 100—250 в, используя для этого источник постоянного тока повышенного напряжения (сухие анодные батареи, коллекторный преобразователь, аккумуляторные батареи и т. п.).

При измерениях сопротивления изоляции сети с помощью омметра с низковольтным источником постоянного тока (в качестве такого омметра удобно использовать тестер ТТ-1, который позволяет измерять сопротивления до 2 мгом, а также может быть использован для измерения напряжения и тока) при однопроводной системе передачи электрической энергии достаточно выключить соответствующими выключателями все потребители, а также отсоединить от сети источники электрической энергии. Необходимость отключения потребителей и генераторов при однопроводной системе передачи электрической энергии очевидна, так как в противном случае при измерениях омметр покажет не сопротивление изоляции, а сопротивление включенного (или включенных) потребителя или генератора (фиг. 21.1), которое будет шунтировать сопротивление изоляции $R_{\text{и}}$.

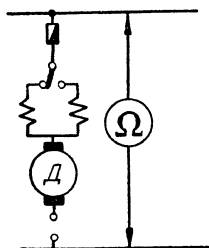
После измерения сопротивления изоляции плюсовой сети (если оно оказалось в нормальных границах) следует проверить изоляцию минусовых цепей потребителей. Для этого следует поочередно отсоединить минусовые провода потребителей от корпуса самолета (в местах разъемов, штепсельных соединений и т. д.), после чего включить выключатель соответствующего потребителя и измерить сопротивление изоляции (фиг. 21.2). Поочередность проверки минусовых цепей потребителей позволяет сразу обнаружить потребитель с неисправной изоляцией в минусовой цепи.



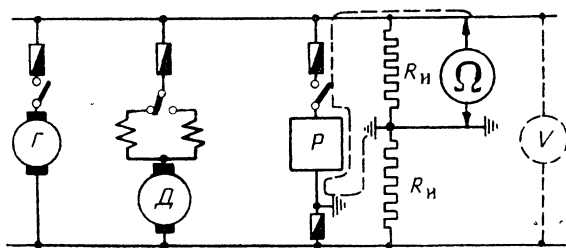
Фиг. 21.1. Шунтирующее действие потребителей при измерении сопротивления изоляции (однопроводная система).

Аналогичным образом следует проверить изоляцию минусовых участков цепей, включаемых с помощью кнопок и нажимных переключателей.

Что касается двухпроводной системы передачи электрической энергии, то здесь следует иметь в виду, что часть потребителей, в частности, некоторая радиоаппаратура и установки электрифицированного вооружения, имеют минусовые зажимы, соединенные с корпусом самолета (фиг. 21.3). Поэтому для измерения сопротивления изоляции необходимо отключить такие потребители, иначе они будут шунтировать сопротивление изоляции (пунктир на фиг. 21.3). При измерениях сопротивления изоляции в двухпроводной сети следует измерить не только сопротивление изоляции всей сети относительно корпуса самолета (для этого необходимо, чтобы какой-либо из потребителей оставался во включенном положении), но и сопротивление изоляции между плюсовым (прямым) и минусовым (обратным) проводами. Последнее можно сделать лишь при



Фиг. 21.2. Схема проверки изоляции минусовой цепи потребителей.



Фиг. 21.3. Шунтирующее действие потребителей при измерении сопротивления изоляции (двухпроводная система).

выключении всех потребителей и генераторов. Следует иметь в виду, что если на самолете установлен вольтметр для измерения напряжения сети, то он должен быть во всех случаях отключен, так как в противном случае внутреннее сопротивление вольтметра будет шунтировать сопротивление изоляции (фиг. 21.1, 21.3). То же самое относится к цепям сигнализации шасси и других агрегатов и механизмов, положение которых на стоянке самолета соответствует замкнутому состоянию контактов концевых выключателей, управляющих сигнальными лампами.

Недостатком указанного способа измерения сопротивления изоляции является то, что оно не дает возможности испытать диэлектрическую прочность изоляции, так как обычные омметры (в частности, и прибор ТТ-1) имеют источник тока низкого напряжения.

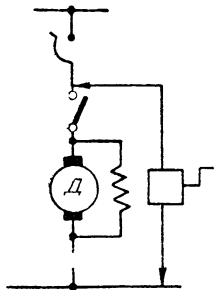
На практике могут быть такие случаи, когда токоведущая жила провода при повреждении изоляции хотя и не соприкасается с корпусом, но находится на незначительном удалении от него.

При вибрациях во время полета не исключена возможность соприкосновения провода с корпусом самолета или пробоя этого промежутка со всеми вытекающими отсюда последствиями. Очевидно, что омметр с низковольтным источником питания такого дефекта не обнаружит. Для того чтобы одновременно с измерением сопротивления изоляции испытать и ее диэлектрическую прочность, необходим прибор с высоковольтным источником тока.

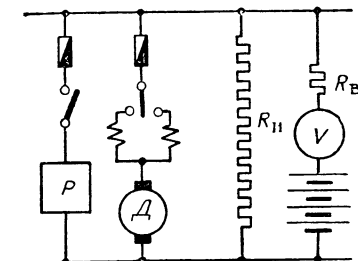
Наиболее подходящим прибором для этой цели является мегомметр (меггер). В качестве мегомметров могут быть использованы как индукторный испытатель изоляции МПИ, так и переносный мегомметр ММГ-1, которые при нормальной скорости вращения их рукояток развивают напряжение, равное 500 в.

При использовании для измерения изоляции мегомметров следует иметь в виду, что напряжение, развиваемое мегомметром при вращении его рукоятки, может оказаться достаточным для пробоя конденсаторов сетевых фильтров, а также фильтров, установленных в цепях потребителей и генераторов электроэнергии. Поэтому перед измерением сопротивления изоляции необходимо отключить все конденсаторы, связанные с испытываемыми цепями. В остальном измерение сопротивления изоляции производится аналогично описанному выше измерению изоляции с помощью омметров.

При отыскании участков с поврежденной изоляцией может возникнуть необходимость проверить сопротивление изоляции отдельного фидера. Для этого необходимо изъять предохранитель или отключить автомат защиты испытываемого



Фиг. 21.4. Схема измерения сопротивления изоляции фидера.



Фиг. 21.5. Схема измерения сопротивления изоляции с помощью вольтметра.

фидера, отсоединить минусовый провод от корпуса, включить выключатель и замерить сопротивление между фидером и корпусом (фиг. 21.4).

Поврежденный участок во всех случаях обнаруживают поочередным отключением отдельных участков цепи с последующим замером сопротивления изоляции.

В случае отсутствия мегомметра измерять изоляцию можно с помощью высокоомного вольтметра постоянного тока шкалой на 150—250 в. Для этого, кроме вольтметра, необходим источник постоянного тока напряжением 150—250 в. При этом вольтметр включается последовательно с источником тока и сопротивлением изоляции (фиг. 21.5). На основании закона Ома ток I_B через вольтметр равен

$$I_B = \frac{U}{R_n + R_B}, \quad (21.1)$$

где R_n — сопротивление изоляции;

R_B — сопротивление вольтметра;

U — напряжение источника питания.

Из (21.1) сопротивление изоляции равно

$$R_n = \frac{U - I_B R_B}{I_B}. \quad (21.2)$$

Величина $I_B R_B$, показываемая вольтметром, равна U_B , следовательно,

$$R_n = \frac{U - U_B}{I_B}. \quad (21.3)$$

Для исключения неизвестной величины I_B числитель и знаменатель умножают на R_B :

$$R_n = \frac{R_B (U - U_B)}{I_B \cdot R_B} = R_B \frac{U - U_B}{U_B}$$

или окончательно

$$R_n = R_B \left(\frac{U}{U_B} - 1 \right). \quad (21.4)$$

Для определения внутреннего сопротивления вольтметра необходимо умножить число ом на вольт, заданное в паспорте вольтметра, на крайнюю цифру используемой шкалы вольтметра в вольтах, например, для вольтметра со шкалой на 250 в на 250.

§ 21.3. ОБНАРУЖЕНИЕ МЕСТА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В САМОЛЕТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Умение быстро обнаруживать и устранять неисправности в самолетной электрической сети имеет очень большое значение, особенно в условиях боевых действий. Правильная ориентировка в определении характера неисправности намного сокращает время на ее отыскание и устранение. Быстрая и правильная ориентировка в характере неисправности дается практическим опытом и четким представлением о тех физических процессах, которые происходят при работе того или иного элемента электрооборудования.

При отыскании неисправности всегда нужно идти от менее сложного к более сложному. Сначала необходимо проверить наличие напряжения на том фидере, где имеется неисправность, затем проверить защитные устройства, потом напряжение на потребителях и затем уже, если неисправность не обнаружена, искать ее в цепях потребителей.

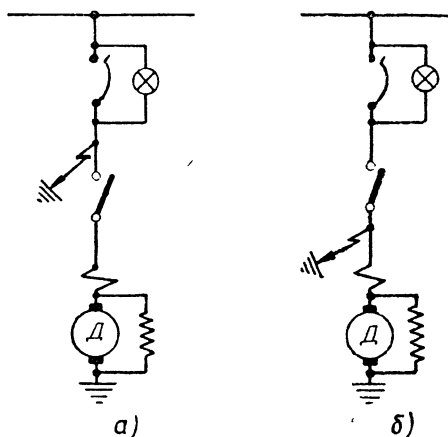
При этом следует пользоваться вольтметром или, что более удобно, переносной контрольной лампой на номинальное напряжение самолетной электрической сети. При отыскании и устранении неисправностей в сети часто оказывается достаточным обнаружить наличие или отсутствие напряжения между теми или иными точками сети, что удобнее производить с помощью контрольной лампы.

Короткие замыкания в самолетной электрической сети могут быть вызваны механическими повреждениями, разрушением изоляции проводов и небрежным монтажом. Обычно короткое замыкание легко обнаруживается по внешним признакам (срабатывание защиты, искрение в штепсельных розетках, нагрев проводов, обгорание и оголение изоляции и т. д.). Если фидер потребителя или участок питательной электрической сети, где произошло короткое замыкание, имеют защиту, то ориентировочное представление о месте короткого замыкания дает сработавшая защита. Однако перегорание предохранителя или выключение автомата защиты фидера не позволяют сразу же делать вывод о наличии короткого замыкания на фидере. Защита может сработать и от перегрузки или больших пусковых токов, а также вследствие перенапряжения в сети при неисправных регуляторах напряжения. Если проверка устанавливает наличие короткого замыкания на фидере, то отыскать место короткого замыкания в однопроводной сети можно следующим образом. Бортовую сеть самолета подключают к аэродромным источникам питания; на зажимы сгоревшего предохранителя или сработавшего автомата защиты включают контрольную лампу. Если замыкание произошло до выключающего устройства, то контрольная лампа загорится полным накалом независимо от положения выключающего устройства (фиг. 21.6,а).

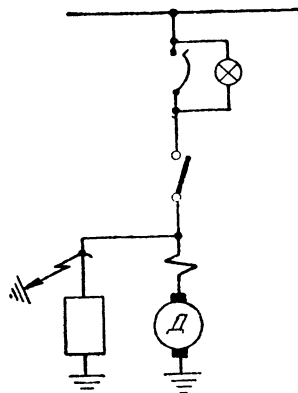
Если замыкание произошло после выключающего устройства, то лампа загорится лишь после его включения (фиг. 21.6,б).

Затем, если обнаружено, что замыкание имеется за выключающим устройством, следует, оставив лампу в указанном положении, произвести поочередное отключение плюсового провода по разъемам, идя от выключающего устройства. Погасание или уменьшение накала лампы указывает, что замыкание находится за отсоединенным проводом, так как при этом лампа включается на нулевое или пониженное напряжение. Горение же лампы указывает на то, что замыкание пройдено. При этом если

в цепи фидера имеется несколько параллельных ветвей, отключение провода, в цепи которого имеется замыкание, приводит не к погасанию контрольной лампы, а к уменьшению ее накала. Это указывает на то, что контрольная лампа включилась последовательно с исправными потребителями электроэнергии (фиг. 21.7), причем степень накала лампы будет зависеть от мощности включенных потребителей (тем меньше, чем меньше мощность включенных потребителей). После того как определен участок замыкания, место замыкания легко обнаруживается внешним осмот-



Фиг. 21.6. Схема для обнаружения короткого замыкания с помощью контрольной лампы.



Фиг. 21.7. Схема отыскания места короткого замыкания путем последовательного отключения участков сети.

ром, так как короткое замыкание чаще всего происходит в местах оголения проводов.

Если короткое замыкание произошло на незащищенном участке сети, то контрольная лампа включается в разрыв плюсового провода источника питания (у ближайшего разъема) и место короткого замыкания отыскивают аналогичным образом путем отсоединения проводов по участкам.

§ 21.4. ОБНАРУЖЕНИЕ МЕСТ ОБРЫВОВ В САМОЛЕТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

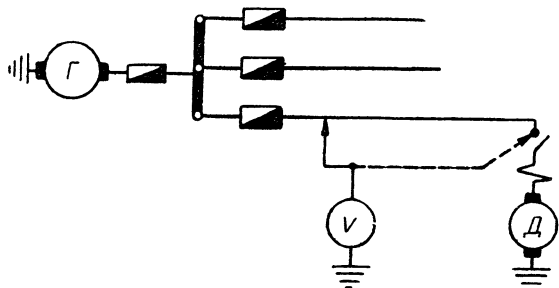
Очень распространенным видом неисправности самолетной электрической сети является обрыв проводов. Наиболее вероятен обрыв проводов в условиях боевых действий в результате поражения самолета пулями и осколками снарядов. В этих случаях обрыв легко обнаруживается внешним осмотром (в доступных местах).

Кроме этого видимого обрыва проводов, может иметь место так называемый внутренний обрыв проводов, когда изоляция провода остается целой, а токоведущая жила внутри изоляции имеет обрыв. Такой внутренний обрыв провода может получиться вследствие натяжения проводов в процессе полета и отсутствия достаточного эксплуатационного запаса по длине, вследствие многократных перегибов провода и т. п.

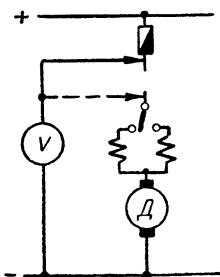
Наиболее часто внутренний обрыв провода обнаруживается в местах крепления провода к наконечникам. Признаком обрыва провода в этом случае является отсутствие напряжения на зажимах потребителя при исправном защитном устройстве.

Место обрыва провода отыскивают с помощью вольтметра, контрольной лампы, омметра или индикатора-пробника.

Наиболее удобным является способ, при котором используются вольтметр или контрольная лампа и напряжение бортовой сети. Минусовый конец вольтметра или один конец контрольной лампы подсоединяют к корпусу самолета (при однопроводной системе), второй конец — к проверяемому проводу (фиг. 21.8), а к сети подводят напряжение.

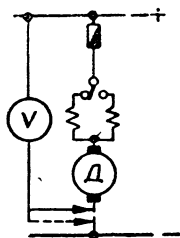


Фиг. 21.8. Схема для обнаружения участка сети, имеющего обрыв, с помощью вольтметра.

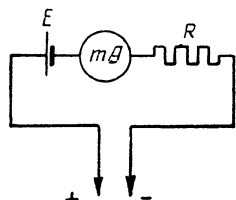


Фиг. 21.9. Схема отыскания обрыва провода в плюсовой цепи.

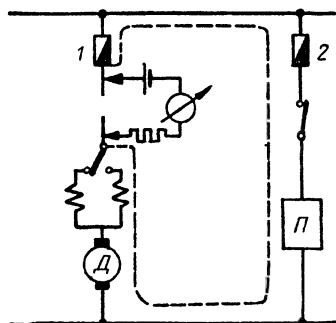
Отклонение стрелки вольтметра или горение лампы указывает на отсутствие обрывов в цепи и наоборот. В двухпроводной сети для проверки целостности плюсового провода вольтметр или контрольную лампу необходимо одним концом (минусом) постоянно присоединять к минусовому проводу, а другим концом проверять исправность плюсового провода (фиг. 21.9). При проверке целостности минусового провода вольтметр или контрольную лампу одним концом (плюсом)



Фиг. 21.10. Схема отыскания обрыва провода в минусовой цепи.



Фиг. 21.11. Схема пробника-индикатора.



Фиг. 21.12. Схема отыскания поврежденного провода с помощью пробника-индикатора.
1 и 2—предохранители; П—потребитель, Д—двигатель.

постоянно подсоединяют к плюсовому проводу, а другим проводом проверяют целостность минусовой цепи (по разъемам) (фиг. 21.10).

Часто, особенно в полевых условиях эксплуатации, очень удобно проверять целостность проводов с помощью индикатора или, как его еще называют, «пробника». Индикатор, или пробник, дает возможность не включать при проверках напряжение в бортовую сеть, так как источник тока монтируется внутри этого пробника. Такой пробник представляет собой небольшой магнитоэлектрический прибор-указатель, смонтированный в коробке и соединенный с сухой карманной батареей и сопротивлением (фиг. 21.11).

Сопротивление R подбирается таким, чтобы отклонение стрелки прибора при замкнутых концах пробника (+) и (—) находилось в пределах шкалы.

Для проверки целостности цепи необходимо провода (+) и (—) пробника соединить с концами проверяемого участка цепи. Отклонение стрелки измерительного прибора пробника укажет на отсутствие обрыва в цепи.

При пользовании пробником следует учитывать электрическую связь проверяемого участка с остальной схемой электрооборудования.

Пробник дает правильное показание только в том случае, когда проверяемый участок цепи отключен от схемы самолета. В противном случае стрелка пробника может отклониться даже при обрыве провода на проверяемом участке вследствие образующейся паразитной цепи тока через потребителей связанных цепей (пунктир на фиг. 21.12).

Для предотвращения этого проверяемый участок следует отключить от остальной схемы, вынув, например, предохранитель I в цепи проверяемого провода. Разумеется, что если имеется омметр, то необходимость в пробнике отпадает.

§ 21.5. ТЕХНИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА САМОЛЕТАХ

При монтаже элементов электрооборудования самолетов, проведении ремонта, осмотра, регламентных работ и т. д., а также в процессе эксплуатации этого оборудования не исключена возможность попадания членов экипажа и обслуживающего персонала под напряжение.

Благодаря тому что корпус самолета используется, как правило, в качестве обратного провода, к ногам или другим частям тела человека, находящегося на самолете, всегда оказывается подведенным один из полюсов источника тока, и для образования цепи тока через тело человека достаточно прикоснуться рукой или какой-либо другой частью тела к другому полюсу источника.

Попасть под напряжение летно-технический персонал может как вследствие прикосновения к оголенным токонесущим частям, так и в результате касания изолированных частей при плохом качестве изоляции.

Существует ошибочное мнение, что электрический ток напряжением до 100 в является безопасным для человека. Это неверно; зарегистрированы несчастные случаи от электрического тока при напряжениях 40—60 в.

Изучение статистики несчастных случаев от электрического тока показывает, что основная доля несчастных случаев приходится на электрические установки сравнительно невысокого напряжения.

Результаты воздействия электрического тока на тело человека весьма разнообразны. Ток может вызвать электрический удар, т. е. поражение организма в целом и местные внешние поражения — травмы.

Основное количество смертельных случаев вызывает электрический удар. Электрический удар характеризуется небольшой величиной поражающего тока (25—100 ма), сравнительно длительным прохождением тока через тело человека (несколько секунд) и ничтожной потребляемой мощностью (до 20 вт).

По мнению ряда исследователей, что подтверждается также последующими вскрытиями, смерть при электрическом ударе происходит главным образом от паралича дыхания и паралича сердца одновременно и в некоторых случаях только от паралича сердца.

Электрические удары вызывают поражение внутренних органов человека и, как правило, не оставляют никаких внешних признаков воздействия тока на человека.

В противоположность этому электрические травмы являются поражением только внешних частей тела и оставляют на теле человека заметные следы. К электрическим травмам относятся ожоги, «электрические знаки» и электрометаллизация кожи.

Ожоги происходят как при непосредственном прохождении тока через тело человека, так и в результате воздействия сильно нагретых током частей электрооборудования или электрической дуги на кожный покров.

Особенно серьезными являются ожоги от электрической дуги. В результате ожога или воздействия лучистой энергии дуги может наступить также и поражение глаз.

Сущность результата поражения электрическим током, носящего название «электрические знаки», до сих пор не выяснена. По внешнему виду это поражение представляет собой выпуклость на коже круглой или эллипсоидальной формы, края которой резко очерчены белой или серой каймой. Кожа в пораженном месте затвердевает в виде мозоли и приобретает желтый или желто-серый цвет. Воспалений, покраснений или нагноений при электрознаке не наблюдается. Особенностью электрического знака является его абсолютная безболезненность как в момент появления, так и после, несмотря на то, что последствия этого поражения бывают очень серьезными. Известны, например, случаи поражения электрическим знаком всей руки, которые приводят к ее мумификации, а затем и к естественной ампутации при отсутствии болезненных явлений при этом.

Электрометаллизация заключается в поверхностном пропитывании кожи частицами металла, расплавляющегося и испаряющегося под действием тока.

При этом поврежденный участок кожи имеет шероховатую жесткую поверхность, а пострадавший испытывает ощущение напряжения от присутствия инородного тела в месте поражения. Исход такого поражения, как и при ожоге, зависит от площади пораженной поверхности.

Степень поражения электрическим током зависит от ряда факторов, к которым в первую очередь относятся величина поражающего тока, продолжительность воздействия тока на организм, путь поражающего тока через организм человека и род и частота тока. Исследования показывают, что непосредственной причиной поражения током живого организма является величина тока, протекающего через организм. Величины приложенного напряжения и сопротивления тела оказывают влияние на степень поражаемости лишь постольку, поскольку ими определяется величина тока через организм. На основании обработки большого опытного материала зависимость степени ощутимости тока человеческим организмом от величины тока может быть представлена табл. 21.1.

Из табл. 21.1 следует, что человеческий организм более легко переносит постоянный ток.

В качестве безопасной для человеческого организма принята такая величина тока, при которой человек может освободиться от действия тока с помощью мышц, непосредственно пораженных током, т. е. может оторвать руку или ногу, попавшую под напряжение, не прибегая к помощи не пораженных током частей тела.

Род и частота тока оказывают очень сильное влияние на степень поражаемости. Выше указывалось, что при одной и той же величине тока постоянный ток переносится человеком значительно легче, чем переменный. Известны случаи прохождения через человека постоянного тока в 61—83 *ма*, не вызвавшие каких-либо серьезных влияний на его сердце и дыхание, причем также не наблюдалось и паралича рук. Некоторые исследователи полагают, что влияние постоянного тока на сердце или дыхание начинается при токах более 80 *ма*.

Таблица 21.1

Таблица ощутимости тока человеческим организмом при положении электродов: рука—рука или рука—нога

Ток в ма	Характер восприятия	
	Переменный ток 50—60 гц	Постоянный ток
0,6—1,5	Начало ощущения, легкое дрожание пальцев рук	Не ощущается
2—3	Сильное дрожание пальцев рук	То же
5—10	Судороги в руках	Зуд, ощущение нагрева
12—15	Руки трудно оторвать от электродов. Сильные боли в пальцах, кистях рук и руках. Состояние терпимо 5—10 сек.	Усиление нагрева
20—25	Руки парализуются немедленно, оторвать их от электродов невозможно. Очень сильные боли. Затрудняется дыхание. Состояние терпимо не более 5 сек.	Еще большее усиление нагрева. Незначительное сокращение мышц рук
50—80	Паралич дыхания. Начало трепетания желудочков сердца*	Сильное ощущение нагрева. Сокращение мышц рук. Судороги, затруднение дыхания
90—110	Паралич дыхания. При длительности 3 сек. и больше паралич сердца—установившееся трепетание желудочков*	Паралич дыхания*
3000 и более	Паралич дыхания и сердца при воздействии более 0,1 сек. Разрушение тканей тела теплом тока*	

Что касается переменного тока, то исследования показывают, что существует такая частота тока, при которой поражение током является наиболее опасным.

Большинство исследователей считает, что наиболее опасной является промышленная частота переменного тока в 50—60 гц. При частоте в 400 гц, которая в настоящее время является общепризнанной для самолетных электрических сетей переменного тока, следует ожидать, что опасность поражения током будет несколько меньшей, нежели при частоте 50 гц.

Однако следует учесть, что самолет с точки зрения поражения обслуживающего персонала током относится к категории помещений с повышенной опасностью вследствие идеально проводящей поверхности пола и стенок (корпуса самолета) и возможности работы в самолете при большой влажности воздуха, близкой к 100 % относительной влажности. Поэтому делать вывод о том, что благодаря применению на самолетах тока повышенной частоты (если самолет имеет систему энергоснабжения на переменном токе) опасность поражения током уменьшается, ни в коем случае нельзя.

Интересно отметить, что токи высокой частоты (порядка 500 000 гц и выше) паралича дыхания и сердца у человека не вызывают даже при сравнительно большой величине (более 100 ма) и часто используются в лечебных целях.

* Данные получены не непосредственным опытом, а главным образом путем анализа происшедших несчастных случаев и последующего подсчета токов на основе установок сработавших реле или параметров сети.

Наиболее серьезным видом поражения человеческого организма током являются электрические удары, так как большинство смертных случаев приходится на этот вид поражения током. Смертельного исхода поражения ударом можно избежать, если своевременно оказать пострадавшему помощь.

Результаты оказания помощи при электрическом ударе в очень сильной степени определяются быстротой оказания помощи после несчастного случая.

Очень важно приступить к оживлению пострадавшего от электрического удара немедленно тут же на месте поражения. Опыты наших научно-исследовательских институтов с животными и практика эксплуатации электрических установок показывают, что оживления, начатые в течение первой минуты после поражения, дают положительный эффект не менее чем в 90% случаях, те же, к которым приступают по прошествии 6 мин., — всего 10%, а после 12 мин. возможность оживления весьма маловероятна.

При оказании первой помощи пострадавшему от тока необходимо сделать следующее:

1. Освободить пострадавшего от тока, обеспечив предварительно собственную безопасность.

2. Освободить пострадавшего от стесняющей дыхание одежды.

3. Осмотреть полость рта пострадавшего, очистить ее от посторонних предметов и удалить вставные челюсти, если они имеются.

4. Без промедления тут же на месте приступить к оказанию первой помощи.

5. Известить дежурного.

6. Вызвать врача или скорую помощь.

7. Послать за аптечкой и средствами по оказанию первой помощи.

8. Обеспечить освещение и приток свежего воздуха.

При этом необходимо учитывать, что:

а) отключение установки может вызвать падение пострадавшего с высоты, например, с крыла или фюзеляжа самолета, с мотогондолы и т. п. Поэтому нужно принять меры, чтобы предупредить или обезопасить его падение;

б) отключением установки можно погасить внутреннее и наружное освещение самолета. Тогда необходимо позаботиться о других источниках света, не задерживая при этом отключение установки и оказание помощи. Если отключить установку быстро нельзя, необходимо отделить пострадавшего от токоведущих частей или провода, воспользовавшись сухой одеждой, веревкой или другим сухим непроводником. Нельзя пользоваться металлическими или мокрыми предметами.

Если после освобождения от тока пострадавший находится в обморочном состоянии, т. е. работа его сердца и органов дыхания не нарушена, то достаточно открыть пострадавшему доступ свежего воздуха, расстегнуть стесняющую дыхание одежду и дать нюхать нашатырный спирт.

Если же дыхание пострадавшего нарушено, стало прерывистым или не пульсирует сердце, то налицо электрический удар — паралич сердца или дыхания. Это состояние мнимой смерти нередко принимается за действительную смерть. Мнимая смерть может перейти в действительную, если не принять экстренных мер к оживлению. Оживление пораженных током производят путем применения искусственного дыхания.

Прежде чем приступить к искусственному дыханию, нужно освободить пострадавшего от стесняющей его одежды: расстегнуть воротник, снять пояс, ремень, снаряжение, распустить тесемки, расстегнуть брюки

и пр.; затем освободить полость рта от инородных предметов, в том числе зубных протезов, очистить рот от грязи, слизи и пр., введя глубоко в полость рта палец, обернутый марлей или полотенцем. Если у пострадавшего тесно сжаты челюсти, то следует их с силой разомкнуть. Для этого применяют специальный роторасширитель, если же таковой отсутствует, то можно воспользоваться ложкой, деревянной палочкой и пр. Если язык запал в глотку, нужно выдвинуть вперед нижнюю челюсть так, чтобы нижние зубы находились впереди верхних. В некоторых случаях приходится вытягивать язык изо рта и так держать его во время искусственного дыхания. За неимением языкодержателя язык можно держать куском марли, носовым платком или полотенцем.

В настоящее время пользуются одним из трех рекомендуемых способов выполнения искусственного дыхания. При первом способе, предложенном Сильвестром, пострадавшего кладут на спину, под нижнюю часть грудной клетки подкладывают валик из сложенного одеяла, шинели или палатки и равномерно опускают и поднимают его руки (фиг. 21. 13). Грудная клетка при этом работает наподобие мехов.

Движение руками нужно производить ритмично с правильными промежутками времени. Чтобы эти движения соответствовали нормальному дыханию, самое лучшее, когда производящий искусственное дыхание принаравливается к собственному дыханию.

При правильно проводимом искусственном дыхании получается звук (как бы стон) от прохождения воздуха через дыхательное горло пострадавшего, когда грудная клетка сдавливается и отпускается.

Если звука нет, то это указывает, что язык запал и мешает прохождению воздуха. Тогда язык нужно вытянуть больше.

При переломе руки или ключицы способ Сильвестра не применяется.

Хорошее вентилирование легких при этом способе искусственного дыхания поддерживает жизненно важную реакцию окисления, однако кровообращение стимулируется слабо, что и явилось причиной того, что в настоящее время предпочтительны второй и третий способы.

При втором способе, предложенном Шеффером, пострадавшего кладут плашмя на живот, а голову поворачивают в сторону, чтобы он мог свободно дышать.

Спасающий садится верхом на его ноги, кладет руки на нижнюю часть грудной клетки, чтобы большие пальцы располагались вдоль позвоночника, а остальные — на ребрах. Во время выдоха нужно наклоняться вперед и сжимать грудную клетку, а во время вдоха выпрямляться и прекращать давление (фиг. 21. 14). Возбуждаемое таким образом сердце начинает биться, а восстановление сердечной функции способствует и восстановлению дыхания, несмотря на то, что вентилирование легких в этом способе вдвое меньше, чем в первом способе.

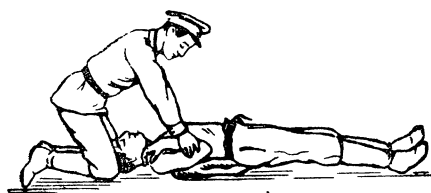
Другим преимуществом второго способа является то, что слюна в процессе проведения искусственного дыхания (при данном положении пострадавшего) не попадает в дыхательное горло и не мешает прохождению воздуха.

Третий способ, предложенный Каллистовым, прост и эффективен. Пострадавшего кладут на живот, лицом вниз. На спину в области лопаток накладывают полотенце, концы его проводят через подмышечные впадины вперед. Оказывающий помощь берет полотенце за концы и приподнимает туловище от земли на 7—10 см. Происходит расширение грудной клетки и поднятие ребер. Приподнимание туловища соответствует вдоху, а последующее опускание — выдоху. Вместо полотенца можно пользоваться ремнем, бинтами и пр.

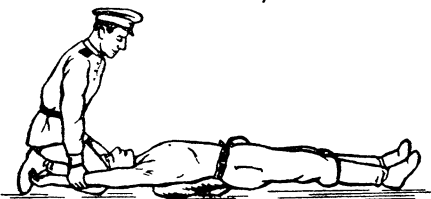
При проведении искусственного дыхания необходимо присматриваться к состоянию пораженного, и если имеются малейшие признаки улучшения (дрожание ресниц, движение губ), следует останавливать на несколько секунд производство искусственного дыхания и давать ему возможность дышать самостоятельно.

Врачи рекомендуют делать такие перерывы на 15—20 сек. после 4—5 мин. производства дыхания, мотивируя это тем, что после некоторого периода искусственного дыхания органы мозга, управляющие дыханием, теряют стимул к работе вследствие низкой концентрации углекислоты в крови.

Прекращение искусственного дыхания на короткий промежуток времени имеет, таким образом, цель довести концентрацию углекислоты в крови до нормы и создать у мозга стимул к самостоятельному дыханию.



а)



б)



а)



б)

Фиг. 21.13. Искусственное дыхание по способу Сильвестра.

Фиг. 21.14. Искусственное дыхание по способу Шеффера.

Во всех случаях оживления рекомендуется согревать тело пострадавшего грелками, одеялами, электрическим обогревом и т. п., так как жизнедеятельность организма прекращается, если температура его становится ниже 23°C . Процесс оживления необходимо вести до тех пор, пока пострадавший не станет дышать самостоятельно, а при неудачном исходе — до окоченения или появления трупных пятен (по инструкции Министерства здравоохранения СССР). Признать пострадавшего мертвым может только врач.

При благоприятном исходе пострадавший должен быть унесен на носилках (или на одеяле) в постель и никоим образом не должен становиться на ноги и ходить, так как сердце его еще очень ослаблено, а отлив крови от головы в крупные сосуды живота может снова лишить его сознания.

Первая помощь при ожогах сводится к следующему:

1. Легкие ожоги следует перевязать, как рану, обеззараженным материалом из перевязочного пакета.

2. При тяжелых обширных ожогах не раздевать пострадавшего, не удалять приставших частей одежды, сделать над носилками полог из брезента, спеловки и т. п., не касающийся тела.

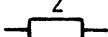
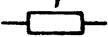
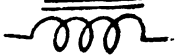
3. Согревать и напоить пострадавшего и обеспечить врачебной помощью.

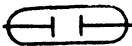
Приложение

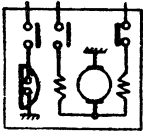
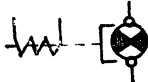
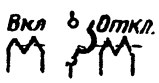
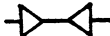
Приводимая ниже таблица составлена по материалам нормали МАП на графические условные обозначения элементов электрических схем самолетов, утвержденной 27/I 1954 г.

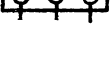
Условные графические обозначения

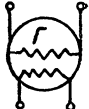
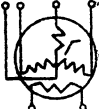
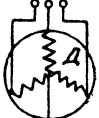
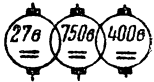
№ по пор.	Наименование	Условное обозначение
1	Постоянный ток	
2	Переменный ток	
3	Переменный трехфазный ток	
4	Соединение трехфазной обмотки в звезду	
5	Соединение трехфазной обмотки в треугольник	
6	Соединение трехфазной обмотки в зигзаг	
7	Соединение трехфазной обмотки в разомкнутый треугольник	
8	Соединение двух фаз в открытый треугольник	
9	Трехфазная обмотка с шестью зажимами	
10	Соединение шестифазной обмотки в звезду	
11	Соединение шестифазной обмотки в два треугольника	

№ по пор.	Наименование	Условное обозначение
12	Соединение шестифазной обмотки в многоугольник	
13	Регулирование без перерыва цепи тока	
14	Подвижный контакт	
15	Полное (кажущееся) сопротивление	
16	Полная (кажущаяся) проводимость	
17	Активное сопротивление	
18	Индуктивное сопротивление	
19	Индуктивно-активное сопротивление катушки, обмотки	
20	Сопротивление индуктивное с железным сердечником (дрессель низкой частоты)	
21	Взаимная индуктивность	
22	Емкость. Конденсатор	
23	Конденсатор электролитический	
24	Элемент схемы с односторонней проводимостью. Вентиль электрический	
25	Вентиль электрический управляемый	
26	Вентиль полупроводниковый	
27	Заземление	

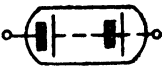
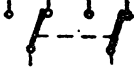
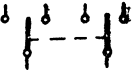
№ по пор.	Наименование	Условное обозначение
28	Электрическая лампа накаливания осветительная	
29	Электрическая лампа накаливания сигнальная	
30	Вакуумный стабилизатор тока (бареттер)	
31	Лампа неоновая	
32	Кодовый огонь	
33	Аэронавигационные огни	
34	Строевой огонь	
35	Контурные огни	
36	Электромагнитный светосигнализатор	
37	Плафон негерметический	
38	Плафон герметический	
39	Лампа УФО	
40	Кабинная лампа с реостатом и кнопкой	
41	Прожектор с электрической дугой	
42	Прожектор с лампой накаливания	
43	Фара посадочная	
44	Фара стационарная	

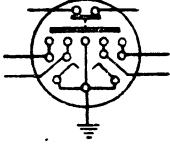
№ по пор.	Наименование	Условное обозначение
45	Фара выдвижная	
46	Фара бомбометания по ведущему	
47	Угольный столбик	
48	Электромагнитная муфта	
49	Электромагнитный тормоз	
50	Тепловой автомат защиты (без свободного расцепления)	
51	Тепловой автомат защиты (со свободным расцеплением)	
52	Автомат защиты биметаллический с автоматическим выключением и ручным включением	
53	Тепловой автомат защиты с самовозвратом	
54	Автомат защиты биметаллический с дистанционным включением и выключением	
55	Провод силовой цепи	
56	Провод цепи управления	
57	Кабель	
58	Пересекающиеся провода, электрически не соединенные	

№ по пор.	Наименование	Условное обозначение
59	Пересекающиеся провода, электрически соединенные	
60	Ответвляющиеся провода	
61	Шина переменного тока с отходящими проводами	
62	Плюсовая шина с отходящими проводами	
63	Минусовая шина с отходящими проводами (при двухпроводной системе)	
64	Разветвление жгута (в полумонтажных схемах)	
65	Провода в открытом жгуте	
66	Провода в металлической плетенке или шланге	
67	Провода в металлической трубе или коробе	
68	Зажим	
69	Клеммная колодка (пример обозначения)	
70	Индивидуальный разъем для провода	
71	Индивидуальный разъем для провода (болтовое соединение)	
72	Коллекторная машина	
73	Коллекторная машина последовательного возбуждения	

№ по пор.	Наименование	Условное обозначение
74	Коллекторная машина параллельного возбуждения	
75	Коллекторная машина смешанного возбуждения	
76	Генератор переменного тока однофазный	
77	Генератор трехфазный синхронный с обмотками, соединенными звездой, с выведенной нулевой точкой	
78	Генератор трехфазный синхронный с выводами шестнадцати концов обмотки	
79	Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором и статорной обмоткой, соединенной звездой, с выведенной нулевой точкой	
80	Машина с возбуждением от постоянных магнитов	
81	Одноякорный преобразователь	
82	Умформер двухколлекторный (пример обозначения)	
83	Умформер трехколлекторный (пример обозначения)	
84	Электромашинный усилитель с поперечным полем	

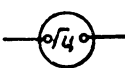
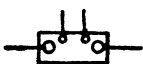
№ по пор.	Наименование	Условное обозначение
85	Электромашинный усилитель с поперечным полем и несколькими обмотками возбуждения	
86	Трансформатор однофазный	
87	Трансформатор трехфазный. Соединение обмоток звезда—звезда	
88	Автотрансформатор	
89	Сельсин-датчик	
90	Сельсин-приемник	
91	Сельсин дифференциальный	
92	Аккумулятор (один элемент)	
93	Аккумуляторная батарея	
94	Переносная аккумуляторная батарея	
95	Сухой гальванический элемент	
96	Сухая гальваническая батарея	
97	Водоналивной гальванический элемент	

№ по пор.	Наименование	Условное обозначение
98	Водоналивная гальваническая батарея	
99	Выключатель	
100	Выключатель нажимной	
101	Выключатель сдвоенный	
102	Выключатель нажимной сдвоенный	
103	Переключатель перекидной	
104	Переключатель с нейтральным положением	
105	Переключатель нажимной с нейтральным положением	
106	Переключатель сдвоенный перекидной	
107	Переключатель сдвоенный с нейтральным положением	
108	Переключатель комбинированный с нейтральным положением (два положения нажимных, одно положение фиксированное)	
109	Переключатель многопозиционный	

№ по пор.	Наименование	Условное обозначение
110	Выключатель до 1000 а с автоматическим отключением	
111	Выключатель высокого напряжения на большую отключающую способность	
112	Переключатель магнето для двух двигателей (пример обозначения)	
113	Кнопка с самовозвратом нормально открытая	
114	Кнопка с самовозвратом нормально закрытая	
115	Кнопка без самовозврата нормально открытая. Контакт ключа	
116	Кнопка без самовозврата нормально закрытая. Контакт ключа	
117	Кнопка с взаимосвязанными контактами с самовозвратом	
118	Путевой (концевой) выключатель с нормально открытым контактом	
119	Путевой (концевой) выключатель с нормально закрытым контактом	
120	Контакт силовой нормально открытый — обозначение для развернутых схем	
121	Контакт силовой нормально закрытый — обозначение для развернутых схем	
122	Контакт движущегося токоприемника	
123	Контакт биметаллического терморегулятора нормально замкнутый	

№ по пор.	Наименование	Условное обозначение
139	Предохранитель тугоплавкий	
140	Предохранитель инерционный	
141	Реле	
142	Катушка реле	
143	Катушка реле, включаемая последовательно	
144	Катушка реле с гильзой	
145	Нагревательный элемент теплового реле	
146	Реле электромагнитное или контактор с одним нормально разомкнутым контактом с двойным разрывом цепи	
147	Реле электромагнитное или контактор с одним нормально замкнутым контактом с двойным разрывом цепи	
148	Реле электромагнитное с одним переключающимся контактом или контактор с переключающимся контактом	
149	Искровой промежуток	
150	Разрядник	
151	Пробивной промежуток	
152	Электрический звонок	

№ по пор.	Наименование	Условное обозначение
153	Электрическая сирена	
154	Электрообогрев экипажа и стекол кабины	
155	Электрообогрев приемника воздушного давления	
156	Пиропатрон	
157	Электрообогрев часов	
158	Измерительный указывающий прибор	
159	Прибор с двухсторонней шкалой	
160	Двойной прибор (два прибора в одном кожухе)	
161	Прибор с контрольной стрелкой для максимального или минимального отсчета	
162	Самопишущий (регистрирующий) прибор	
163	Вольтметр постоянного тока	
164	Вольтметр переменного тока	
165	Амперметр постоянного тока	
166	Амперметр переменного тока	

№ по пор.	Наименование	Условное обозначение
167	Вольтамперметр постоянного тока	
168	Амперметр с встроенным трансформатором тока	
169	Ваттметр постоянного тока	
170	Ваттметр переменного тока	
171	Частотомер	
172	Фазометр	
173	Частотомер	
174	Омметр	
175	Электрический тахометр	
176	Счетчик	
177	Шунт амперметра	
178	Трансформатор тока	
179	Термопара	

ЛИТЕРАТУРА

- Бабилов М. А., Электрические аппараты, Госэнергоиздат, 1951.
- Бердичевский Б. Е., Электрооборудование самолетов, Оборонгиз, 1943.
- Буйлов А. Я., Основы электроаппаратостроения, Госэнергоиздат, 1946.
- Глазунов А. А., Сети электрических систем, Госэнергоиздат, 1947.
- Гошек И., Аэродинамика больших скоростей, Изд. иностр. литер., 1954.
- Ермолин Н. П., Переходные процессы в машинах постоянного тока, Госэнергоиздат, 1951.
- Займовский А. С., Усов В. В., Металлы и сплавы в электротехнике, Госэнергоиздат, 1949.
- Иносов В. А., Цукерник Л. В., Компаундирование мощных синхронных генераторов с электромагнитным контактором напряжения, «Электричество», 1949, № 9.
- Каплянский А. Е., Самолетные источники электрической энергии, Воениздат, 1949.
- Капцов Н. А., Электрические явления в газах и вакууме, Госэнергоиздат, 1950.
- Князев В. Н., Полищук К. Е., Оборудование самолетов, Оборонгиз, 1952.
- Костенко М. П., Электрические машины, Госэнергоиздат, 1944.
- Коробан Н. Т., Авиационные аккумуляторы, Оборонгиз, 1945.
- Коробан Н. Т., Работа авиационных аккумуляторов в летных условиях, Труды ЛИИ, вып. 3, 1941.
- Краус С. В., Сорокер Т. Г., Стабилизация тока нагрузки в схеме с генератором с постоянными магнитами, ВЭП, 1947, № 9.
- Кузнецов А. Н., Техника безопасности в электрических установках, Госэнергоиздат, 1950.
- Кулебакин В. С., Сенкевич А. М., Электрооборудование самолетов, ВВИА им. Жуковского, 1945.
- Кулебакин В. С., Испытание электрических машин и трансформаторов, ОНТИ, 1935.
- Кулебакин В. С., Кинетика возбуждения синхронных машин, ОНТИ, 1934.
- Кулебакин В. С., Электрическая аппаратура, т. I, 1932.
- Ларионов А. Н., Возбуждение генераторов повышенной частоты постоянными магнитами, «Электричество», 1940.
- Ларионов А. Н. (под ред.), Основы электрооборудования самолетов и автомашин, Госэнергоиздат, 1955.
- Линниченко Н. Н., Гашение дуги струей сжатого воздуха, «Электричество», 1949, № 1.
- Окатов А. П., Химические источники тока, Госхимиздат, 1948.
- Петров Г. Н. и др., Электрические машины, Госэнергоиздат, 1940.
- Пиотровский Л. М., Электрические машины, Госэнергоиздат, 1949.
- Попов Д. А., О выборе конфигурации самолетных электрических сетей, Труды ГК НИИ ВВС, № 14, 1956.
- Романов М. А., Зорохович А. Е., Максимов В. С., Хмельницкий И. И., Источники электрической энергии на самолете, Воениздат, 1947.
- Розенблат М. А., Магнитные усилители, Госэнергоиздат, 1949.
- Рябков А. Я., Электрический расчет электрических сетей, Госэнергоиздат, 1950.
- Сотсков Б. С., Элементы автоматической и телемеханической аппаратуры, Госэнергоиздат, 1950.
- Ульянов С. А., Короткие замыкания в электрических системах, Госэнергоиздат, 1949.
- Федосеев А. М., Релейная защита электрических систем, Госэнергоиздат, 1951.
- Юров Ю. Я., Параллельная работа самолетных генераторов постоянного тока, ВЭП, 1946.
- Юдицкий С. Б., Синхронные машины с твердыми выпрямителями, МЭП, 1948. Труды МАИ, № 57, Оборонгиз, 1956.
- AIEE Transactions, Part II, vol. 72, 1953.
- AIEE Transactions, Part II, vol. 71, 1952.
- AIEE Transactions, Part II, vol. 73, 1954.
- Flight, Jan., 1955.
- G.E.R., 1, 3, 4, 1945.
- Electrical Engineering, May, 1955.
- Journal of Royal Aeronautical Society, September, 1955.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	<i>Стр.</i>
<i>Предисловие</i>	3
<i>Введение</i>	5
§ 1. Области применения и роль электрического самолетного оборудования	5
§ 2. Краткий исторический очерк развития электрификации самолетов	6
§ 3. Основные элементы электрооборудования самолетов	10
§ 4. Особенности условий работы самолетного электрооборудования	10
§ 5. Основные тактико-технические требования к электрооборудованию самолетов	15
Глава I. Химические источники тока	18
§ 1.1. Применение химических источников тока в авиации	18
§ 1.2. Принцип действия свинцового аккумулятора	20
§ 1.3. Устройство авиационных аккумуляторов	21
§ 1.4. Электролит свинцовых аккумуляторов	25
§ 1.5. Характеристики свинцовых аккумуляторов	29
§ 1.6. Установка аккумуляторов на самолетах. Присоединение аэродромных источников электрической энергии к бортовой сети самолета	41
§ 1.7. Заряд и разряд аккумуляторов	42
§ 1.8. Техническое обслуживание авиационных аккумуляторов	46
§ 1.9. Авиационные щелочные аккумуляторы	49
Глава II. Генераторы постоянного тока	53
§ 2.1. Особенности самолетных генераторов постоянного тока и требования, предъявляемые к ним	53
§ 2.2. Щетки и щеточные устройства самолетных генераторов	57
§ 2.3. Привод самолетных генераторов постоянного тока	62
Глава III. Основные электрические и магнитные характеристики самолетных генераторов постоянного тока	70
§ 3.1. Характеристики возбуждения	70
§ 3.2. Внешние характеристики	73
§ 3.3. Условия самовозбуждения генераторов	76
§ 3.4. Реостатные скоростные характеристики	78
§ 3.5. Статическая устойчивость возбуждения и критерий статической устойчивости генератора с самовозбуждением	82
Глава IV. Регулирование напряжения самолетных генераторов постоянного тока	86
§ 4.1. Основные методы регулирования напряжения генераторов постоянного тока	86
§ 4.2. Кратность регулировки тока возбуждения	88
§ 4.3. Способы включения регуляторов возбуждения	89
Глава V. Стабилизация напряжения посредством регуляторов с плавным изменением сопротивления	93
§ 5.1. Общие свойства угольных контактных реостатов регуляторов	93
§ 5.2. Принцип устройства угольных регуляторов напряжения	95
§ 5.3. Настройка угольного регулятора напряжения	99
§ 5.4. Динамика процесса регулирования напряжения с помощью угольного регулятора	103
§ 5.5. Оценка устойчивости процесса регулирования и точности работы регулятора	112
§ 5.6. Методы повышения устойчивости процесса регулирования с угольным регулятором напряжения	115
§ 5.7. Установка на самолете и эксплуатация угольного регулятора напряжения	119

	<i>Стр.</i>
Глава VI. Стабилизация напряжения посредством регуляторов вибрационного типа	121
§ 6.1. Общая теория статике регулирования напряжения с помощью вибрирующих контактов	121
§ 6.2. Амплитуды пульсаций напряжения при постоянной частоте вибрации контактов	129
§ 6.3. Принцип действия и устройства автоматических вибрационных регуляторов напряжения	130
§ 6.4. Конструкция автоматических регуляторов напряжения вибрационного типа	131
§ 6.5. Амплитуда пульсаций напряжения и частота вибрации автоматического вибрационного регулятора напряжения	133
§ 6.6. Способы повышения частоты вибрации контактов	135
Глава VII. Параллельная работа самолетных генераторов друг с другом и с аккумуляторными батареями	137
§ 7.1. Необходимые условия для параллельной работы генераторов	137
§ 7.2. Включение регуляторов напряжения при параллельной работе генераторов	138
§ 7.3. Роль уравнивательной обмотки	140
§ 7.4. Параллельная работа двух генераторов, снабженных регуляторами напряжения	142
§ 7.5. Параллельная работа нескольких генераторов, снабженных регуляторами напряжения	151
§ 7.6. Параллельная работа генератора с аккумуляторной батареей	155
§ 7.7. Влияние степени заряженности аккумуляторной батареи	158
Глава VIII. Защита самолетных генераторов постоянного тока	162
§ 8.1. Защита генераторов от обратных токов	162
§ 8.2. Защита генераторов от перегрузок	169
§ 8.3. Короткое замыкание на зажимах самолетного генератора постоянного тока	174
§ 8.4. Защита генераторов постоянного тока от коротких замыканий	181
Глава IX. Генерирование переменного тока на самолете	183
§ 9.1. Особенности самолетных генераторов переменного тока	183
§ 9.2. Основные электрические свойства самолетных генераторов переменного тока	184
§ 9.3. Возбуждение генераторов переменного тока	190
§ 9.4. Способы привода самолетных генераторов переменного тока	194
Глава X. Регулирование напряжения самолетных генераторов переменного тока	211
§ 10.1. Особенности регулирования напряжения самолетных генераторов переменного тока	211
§ 10.2. Включение обмотки однофазного регулятора напряжения через трехфазную выпрямительную схему	213
§ 10.3. Включение обмотки однофазного регулятора через фильтр напряжения прямой последовательности	215
§ 10.4. Стабилизация соотношения реактивных нагрузок при параллельной работе генераторов на общие шины	219
§ 10.5. Автоматическое регулирование напряжения самолетных синхронных генераторов	223
§ 10.6. Стабилизация напряжения синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов	228
Глава XI. Параллельная работа самолетных генераторов переменного тока	233
§ 11.1. Условия параллельной работы генераторов переменного тока	233
§ 11.2. Параллельная работа двух генераторов, вращающихся с постоянными угловыми скоростями, из которых один обладает бесконечно большой мощностью	234
§ 11.3. Параллельная работа синхронных генераторов при постоянном возбуждении и переменной активной мощности (перевод нагрузки)	242
§ 11.4. Параллельная работа двух сравнимых по мощности генераторов	243
§ 11.5. Автоматическое распределение активных мощностей между параллельно работающими самолетными синхронными генераторами	244
§ 11.6. Включение самолетных синхронных генераторов на параллельную работу	249

	<i>Стр.</i>
Глава XII. Короткие замыкания и защита самолетных синхронных генераторов	253
§ 12.1. Короткое замыкание на зажимах синхронного генератора	253
§ 12.2. Максимально-токовая релейная защита синхронного генератора	259
§ 12.3. Релейная продольная дифференциально-токовая защита синхронного генератора	261
§ 12.4. Автоматические устройства для гашения магнитного поля генераторов	263
Глава XIII. Преобразователи напряжения и рода тока	266
§ 13.1. Преобразователи постоянного тока низкого напряжения в постоянный ток повышенного напряжения	267
§ 13.2. Преобразователи постоянного тока в переменный	270
§ 13.3. Методы стабилизации частоты переменного тока в преобразователях	272
§ 13.4. Статические преобразователи переменного тока в постоянный	279
§ 13.5. Схемы включения вентилях при выпрямлении переменного тока	285
Глава XIV. Построение графиков электрических нагрузок и выбор источников электрической энергии на самолете	288
§ 14.1. Построение графика нагрузок самолетных источников электрической энергии	288
§ 14.2. Выбор основных источников электрической энергии	294
§ 14.3. Выбор резервных источников электрической энергии	295
§ 14.4. Аварийные графики нагрузок, графики нагрузок на синхронные генераторы и графики нагрузок для распределительных устройств	299
Глава XV. Основные сведения о системах передачи и распределения электрической энергии	304
§ 15.1. Назначение системы передачи и распределения электрической энергии	304
§ 15.2. Тактико-технические требования к системам передачи и распределения электрической энергии	304
§ 15.3. Классификация самолетных электрических сетей	305
§ 15.4. Системы передачи электрической энергии постоянного тока	311
§ 15.5. Системы передачи электрической энергии переменного тока	314
Глава XVI. Элементы системы передачи и распределения электрической энергии	317
§ 16.1. Самолетные провода	317
§ 16.2. Монтажное и установочное оборудование	321
§ 16.3. Коммутационная и защитная аппаратура	326
§ 16.4. Изображение схем самолетных электрических сетей	334
Глава XVII. Расчет электрической сети самолета	341
§ 17.1. Особенности расчета самолетных электрических сетей	341
§ 17.2. Расчет проводов электрической сети самолета на нагрев	342
§ 17.3. Выбор сечения проводов по допустимым нагрузкам из условий нагрева	346
§ 17.4. Общие вопросы расчета проводов электрической сети на потери напряжения	348
§ 17.5. Основные расчетные параметры сети	351
§ 17.6. Расчет радиальных самолетных электрических сетей постоянного тока на потери напряжения	355
§ 17.7. Эксплуатационно выгодная плотность тока и потеря напряжения	363
§ 17.8. Расчет замкнутых самолетных электрических сетей постоянного тока на потерю напряжения	366
§ 17.9. Особенности расчета самолетных электрических сетей переменного тока	374
Глава XVIII. Аварийные режимы в самолетных сетях и расчет токов короткого замыкания	379
§ 18.1. Аварийные режимы в системах передачи и распределения электрической энергии на самолете	379
§ 18.2. Сопротивление элементов электрооборудования при коротких замыканиях и вольтамперные характеристики	380

	<i>Стр.</i>
§ 18.3. Вольтамперные характеристики источников постоянного тока . . .	382
§ 18.4. Вольтамперные характеристики потребителей постоянного тока . . .	388
§ 18.5. Расчет токов короткого замыкания с помощью вольтамперных характеристик	392
§ 18.6. Графо-аналитический расчет токов короткого замыкания	399
§ 18.7. О расчетах токов короткого замыкания в самолетных электрических сетях переменного тока	401
Глава XIX. Защита самолетных электрических сетей	406
§ 19.1. Основные требования к защите самолетных электрических сетей	406
§ 19.2. Общие сведения об аппаратуре защиты распределительной сети самолета	409
§ 19.3. Амперсекундные характеристики плавких предохранителей . . .	412
§ 19.4. Амперсекундные характеристики самолетных тепловых автоматов защиты	415
§ 19.5. Защита распределительной сети с помощью плавких вставок и тепловых автоматов	419
§ 19.6. Защита питательной электрической сети самолета плавкими предохранителями и тепловыми автоматами	423
§ 19.7. Дифференциальная защита питательной электрической сети самолета	426
§ 19.8. Автоматическое резервирование самолетных питательных сетей . .	430
§ 19.9. Особенности защиты самолетных электрических сетей переменного тока	431
Глава XX. Основные вопросы теории коммутации самолетных электрических сетей	435
§ 20.1. Условия включения и выключения электрической цепи и процесс размыкания	435
§ 20.2. Вольтамперная характеристика дуги постоянного тока	437
§ 20.3. Условия устойчивого горения дуги. Условия гашения дуги	439
§ 20.4. Особенности горения и гашения дуги переменного тока	441
§ 20.5. Способы гашения электрической дуги	446
Глава XXI. Эксплуатация систем передачи и распределения электрической энергии на самолетах	448
§ 21.1. Требования к изоляции системы передачи и распределения электрической энергии на самолетах	448
§ 21.2. Контроль за состоянием изоляции системы передачи и распределения электрической энергии	450
§ 21.3. Обнаружение места короткого замыкания в самолетной электрической сети	453
§ 21.4. Обнаружение мест обрывов в самолетной электрической сети . .	454
§ 21.5. Техника электрической безопасности на самолетах	456
Приложение. Условные графические обозначения	462
Литература	475

*Виктор Сергеевич Кулебакин, Владимир Тихонович Морозовский,
Игорь Михайлович Синдеев*

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ САМОЛЕТОВ
ПРОИЗВОДСТВО, ПРЕОБРАЗОВАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА САМОЛЕТАХ

Издательский редактор *М. Ф. Богомолова.*

Технич. редактор *И. М. Зудакин*

Г-22965

Подписано в печать 9/X 1956 г.

Учетно-изд. л. 37,73

Формат бумаги $70 \times 108 \frac{1}{8}$. 15 бум. л.—41,1 печ. л.

Цена в пер. 14 р. 70 к.

Тираж 7000 экз.

Заказ 1417/1480

Типография Оборонгиза

Замеченные опечатки

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть	По чьей вине
24	23 снизу	двумя	тремя	авт.
55	21 снизу	конвенционный	конвекционный	тип.
57	4 сверху	Поток, поступающий	Поток поступающей	тип.
60	26 снизу	воздуха. Как видно	воздуха, как это видно	авт.
71	13 снизу	он равен	оно равно	авт.
110	12 снизу	А	2	корр. изд.
113	3 сверху	симметричного	самолетного	авт.
117	Ф-ла (5. 80) в знаменателе	$\left(r_{\text{эо}} + \frac{r_{\text{э.д}}}{r_{\text{э.д}} + r_{\text{ст}}}\right)$	$\left(r_{\text{эо}} + \frac{r_{\text{ст}} r_{\text{э.д}}}{r_{\text{э.д}} + r_{\text{ст}}}\right)$	авт.
164	9 сверху	меньше	меньшем	тип.
168	2 снизу	обмотке	обмотку	авт.
173	12 снизу	(8.5)	(8.9)	авт.
227	Подпись к фиг. 10. 27	корректора	регулятора	авт.
268	19 снизу	0,3÷0,5	0,3 ÷ 0,6	авт.
312	8 сверху	соединение из полюсов	соединение одного из полюсов	ред.
356	10 сверху	табл. 17.3	табл. 17.4	авт.
364	9 снизу в числителе	$\frac{I_i}{S_1}$	$\frac{I_i}{S_i}$	авт.
372— 373	Фиг. 17. 21; 17. 22	направление стрелки для ΔI следует изменить на обратное		авт.
374	13 сверху	$= I_q + \frac{I_n}{2} - \Delta I = I_1 - \Delta I$	$= I_q + \frac{I_n}{2} + \Delta I = I_1 + \Delta I$	авт.
374	16 сверху	(17. 104)	(17. 110)	авт.
377	12 сверху	(17. 32) и (17. 33)	(17. 27) и (17. 28)	авт.
475	12 сверху	контактором	корректором	авт.

Зак. 1417/1480

овский,

ЕНИЕ

ЭЛЕКТРОМАШИНА САНОВАТОР

САНОВАТОР
ЭЛЕКТРОМАШИНА
САНОВАТОР

ЭЛЕКТРОМАШИНА
САНОВАТОР

САНОВАТОР